

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE FUNDAÇÃO NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE VIAS-FÉRREAS DE ALTA VELOCIDADE

Análise do caso de Ledsgard

PHILIPPE DA ENCARNAÇÃO CONTENTE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Rui Artur Bártolo Calçada

JULHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Ao Bruno Aleixo

Todo o nosso conhecimento se inicia com sentimentos

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Este trabalho nunca estaria concluído sem prestar os meus mais sinceros agradecimentos a várias pessoas que directa ou indirectamente contribuíram para a sua realização.

Ao Professor Rui Artur Bártolo Calçada, orientador da presente dissertação, pelo interessante tema proposto e pela sua capacidade de transmissão de conhecimentos.

Ao Engenheiro Pedro Miguel Barbosa Alves Costa quero agradecer toda a disponibilidade e paciência revelada ao longo do período de elaboração desta tese. O incansável apoio e dedicação, que desempenharam um importante papel, à atenção dispensada e à revisão do trabalho com todas as sugestões e indicações para a sua melhoria.

À secção de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto por toda a aprendizagem e formação prestada, que muito contribuiu para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Tomar, pela formação académica adquirida, em particular à Professora Ana Paula Gerardo Machado, por incutir o gosto pela área da geotecnia e por toda a bibliografia fornecida durante a pesquisa realizada.

Ao grande amigo Bruno Aleixo, verdadeira fonte de inspiração, que contribuiu através da sua notável capacidade de incentivo, partilha de experiências de vida e por todos os conselhos transmitidos.

Ao meu amigo Ricardo Coutinho pela sua constante ajuda ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus amigos e aos meus colegas por toda a amizade e apoio, estando sempre presentes ao longo da vida, tanto nos bons como nos maus momentos.

E por último, quero agradecer aos meus pais, ao meu irmão e à Inês por todo o apoio e incentivo ao longo deste último semestre.

RESUMO

A Alta Velocidade é um tema que tem despertado o interesse de grande parte da sociedade. As inúmeras vantagens que proporciona fazem com que as entidades governamentais apostem neste sector de transportes, solidificando a rede transeuropeia e consequentemente a própria rede mundial. Portugal dispõe actualmente de um projecto que permite a integração do país, num futuro próximo, nessa rede europeia.

O rápido desenvolvimento das redes de Alta Velocidade é acompanhado por um novo tipo de problemas que está relacionado com o comportamento dinâmico do sistema comboio-via-solo.

Esta problemática agrava-se quando as linhas de Alta Velocidade atravessam cenários geotécnicos menos favoráveis como é o caso das zonas aluvionares. A experiência adquirida em alguns países mostra que é no atravessamento destas zonas que os fenómenos de amplificação dinâmica tomam maior significado, podendo comprometer a operacionalidade da via.

O presente trabalho tem como objectivo investigar a influência das características do solo de fundação, do tipo de comboio e da velocidade na resposta dinâmica do sistema via-comboio, tendo em vista a identificação de necessidades de melhoramento das condições de fundação da via.

Nos últimos anos, muitos autores tem recorrido a soluções numéricas, analíticas e semi-analíticas para prever os efeitos dinâmicos que resultam da passagem de comboios nos referidos ambientes geotécnicos desfavoráveis. Os modelos numéricos e semi-analíticos, apoiados em metodologias computacionais, têm sido dos mais utilizados, obtendo-se geralmente resultados numéricos satisfatórios comparativamente aos experimentais.

A FEUP também já apresenta alguma experiência nesta área, tendo desenvolvido de raiz algumas formulações para análise do comportamento dinâmico do sistema solo-via-comboio. Neste trabalho recorreu-se a uma dessas formulações para efectuar uma análise numérica no domínio da frequência, baseado no método dos elementos finitos transformados (TFEM). Esta metodologia foi aplicada ao caso de Ledsgard (Suécia), de modo a aferir a funcionalidade do programa, confrontando os dados numéricos com os dados experimentais para a passagem do comboio X2000. Posto isto, submeteu-se a mesma via à passagem de outros comboios europeus de Alta Velocidade para poder efectuar uma análise comparativa dos efeitos dinâmicos que ocorrem ao nível da fundação da via.

PALAVRAS-CHAVE: Via-férrea, Alta Velocidade, Ledsgard, Dinâmica, Fundação de vias-férreas.

ABSTRACT

The High Speed is an issue that has attracted the interest of a large part of society. The numerous advantages it provides make it the government engage in the transport sector, solidified the network and the global network. Portugal has currently a project, which allows the future integration of the country in the European rail network.

The rapid development of high-speed networks is accompanied by a new type of problem that is related to the dynamic behaviour of the train-track-soil system.

The problem worsens when the high-speed lines crossing less favourable geotechnical scenarios such as alluvial areas. Experience in some countries shows that it is in the crossing of these areas, that the phenomena of dynamic amplification take greater significance, and may compromise the operation of the track.

This study aims to investigate the influence of soil characteristics of foundation, the type of train speed and dynamic response of the track-train system in order to identify needs for improvement of the foundation of the track.

In recent years, many authors have resorted to numerical solutions, analytical and semi-analytical to predict the dynamic effects resulting from the passage of trains in such environments geotechnical unfavourable.

The numerical models and semi-analytical, supported by computational methods, have been the most used, obtaining numerical results generally satisfactory compared to experimental.

The Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP) also already has some experience in this area, having developed from scratch some formulations for analysis of the dynamic behaviour of the soil-track-train system. In this work appealed to one of these formulations to make a numerical analysis in the frequency, based on the transformed finite element method (TFEM). This methodology was applied to the famous case of Ledsgard (Sweden), to assess the functionality of the program, comparing the numerical and experimental data to the passage of the train X2000. Hereupon, submitted the same track by the passage of other European High-speed trains to carry out a comparative analysis of the dynamic effects that occur at the foundation of the track.

KEYWORDS: Railway track, High-Speed, Dynamic, Ledsgard, Foundation of railway tracks.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE QUADROS	xiii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xv

1. INTRODUÇÃO	1
----------------------------	---

2. DESCRIÇÃO GERAL DA EVOLUÇÃO DAS REDES FERROVIÁRIAS	3
--	---

2.1 BREVE ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DOS CAMINHOS-DE-FERRO	3
2.2 CONSTITUIÇÃO DE UMA VIA-FÉRREA	4
2.2.1 SUBESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA	4
2.2.2 SUPERESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA	7
2.3 LINHAS DE ALTA VELOCIDADE	9
2.3.1 EVOLUÇÃO DAS REDES DE ALTA VELOCIDADE	9
2.3.2 CARACTERIZAÇÃO DE UMA LINHA DE ALTA VELOCIDADE	17
2.3.3 BENEFÍCIOS DA ALTA VELOCIDADE	20

3. PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA VIA-COMBOIO	23
---	----

3.1 PROBLEMAS DINÂMICOS ASSOCIADOS À AV	23
3.1.1 VIBRAÇÕES AO LONGO DA VIA	24
3.1.2 VIBRAÇÕES NA VIZINHANÇA DA VIA	26
3.1.3 VIBRAÇÕES NAS CATENÁRIAS E OUTROS ELEMENTOS DA ESTRUTURA FERROVIÁRIA	28
3.2 MÉTODOS DOS INTEGRAIS TRANSFORMADOS NA MODELAÇÃO DE MACIÇOS ESTRATIFICADOS HORIZONTALMENTE	29
3.3 MODELAÇÃO DA VIA-FÉRREA	31
3.4 CARGAS MÓVEIS	32

3.4.1 DEFINIÇÃO DO MODELO DE CARREGAMENTO	32
3.4.2 COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE ADOPTADOS NO CÁLCULO NUMÉRICO	34
3.5 EXPERIÊNCIA COMPUTACIONAL NA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA VIA-FÉRREA	45
 4. ESTUDO DO CASO DE LEDSGARD	47
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL	47
4.2 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO ADOPTADAS EM LEDSGARD	51
4.3 MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	54
4.4 VALIDAÇÃO COM BASE EM RESULTADOS DA MONITORIZAÇÃO.....	55
4.5 EFEITOS DINÂMICOS NA VIA.....	59
4.6 EFEITOS DINÂMICOS NA VIZINHANÇA DA VIA	73
4.7 ESTUDO PARAMÉTRICO	80
4.7.1 ALTERAÇÕES DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	80
4.7.2 REMOÇÃO DO ESTRATO DE ARGILA ORGÂNICA	82
4.7.3 POSIÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO.....	87
 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	93
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
5.2 SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	95
 BIBLIOGRAFIA	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema estrutural da via balastrada: a) perfil transversal; b) perfil longitudinal (Fortunato, 2005)	5
Figura 2 – Elementos de fixação dos carris (Adaptado de GlobalSecurity.org – www.globalsecurity.org)	8
Figura 3 – Distribuição das tensões nas travessas da via-férrea (Fortunato, 2006)	8
Figura 4 – Ferrovia: a) Com travessas de madeira; b) Com travessas em betão (Fonte: Wikimédia Commons); (Fonte: China Digital Times)	9
Figura 5 – Alta Velocidade no mundo (Adaptado de UIC - www.uic.asso.fr)	10
Figura 6 – Rede da AV prevista para Portugal	12
Figura 7 – Estado actual da rede transeuropeia (Adaptado de UIC - www.uic.asso.fr)	13
Figura 8 – Previsão da rede transeuropeia para 2025 (Adaptado de UIC - www.uic.asso.fr)	15
Figura 9 – Esquematização do 1º tipo de metodologia de operação de uma rede de caminhos-de-ferro	18
Figura 10 – Esquematização do 2º tipo de metodologia de operação de uma rede de caminhos-de-ferro	19
Figura 11 – Esquematização do 3º tipo de metodologia de operação de uma rede de caminhos-de-ferro	19
Figura 12 – Esquematização do 4º tipo de metodologia de operação de uma rede de caminhos-de-ferro	19
Figura 13 – Evolução da velocidade máxima em Vias-Férreas (Adaptado de Barrón, 2008)	20
Figura 14 – Evolução da distância temporal na rede europeia de AV (Fonte: “Accessibility and Economic Development in Europe”; Vickerman & Spiekermann & Wegener, 1997)	21
Figura 15 – Esquema de monitorização de vibrações emitidas à passagem de comboios de AV (Adaptado de Madshus, 2007)	23
Figura 16 – Desvio de fase dos assentamentos verticais relativamente aos eixos de carregamento (Adaptado de “Madshus et al.”, 2004)	25
Figura 17 – Isolinhas dos deslocamentos na vizinhança da via, sendo o movimento das forças orientado no sentido da esquerda para a direita com velocidade igual a: a) 25 % da velocidade das ondas de Rayleigh; b) 98 % da velocidade das ondas de Rayleigh (Holm et al., 2002)	26
Figura 18 – Ondas de propagação: a) Ondas P (Primárias); b) Ondas S (Secundárias); c) Ondas R (Rayleigh) (Adaptado de Braile, 2000)	27
Figura 19 – Esquematização da evolução do cone de Mach	28
Figura 20 – Maciço estratificado sujeito a carregamento dinâmico: a) Problema real; b) Problema no domínio transformado com a respectiva malha de elementos finitos	30
Figura 21 – Modelação da via-férrea: a) Estrutura real; b) Modelo da viga de Bernoulli-Euler (Alves Costa, 2008)	31

Figura 22 – Modelo analógico de uma carruagem com os respectivos rodados, bogies e suspensões	33
Figura 23 – Comboio X2000 da SJ a passar em Gripenberg, Suécia (Fonte: F.Iliovici – www.railpictures.net)	34
Figura 24 – Comboio X2000 adoptado nas simulações.....	34
Figura 25 – Modelo do carregamento referente ao comboio X2000.....	35
Figura 26 – ETR 500 da FS a circular em Bolonha, Florença (Fonte: G.Berto – www.railpictures.net).....	35
Figura 27 – Comboio ETR adoptado nas simulações.....	36
Figura 28 – Modelo do carregamento referente ao comboio ETR.....	36
Figura 29 – Eurostar em Landry, França (Fonte: E.Raphael – www.pbase.com)	37
Figura 30 – Comboio Eurostar adoptado nas simulações	37
Figura 31 – Modelo do carregamento, referente ao comboio Eurostar	38
Figura 32 – ICE 2: a) ICE 2 em Bavaria, Alemanha; b) ICE 2 duplo da DB a passar por Alexanderplatz em Berlim (Fonte: D. Kerston; A. Stroshane – www.railpictures.net)	38
Figura 33 – Comboio ICE-2 adoptado nas simulações.....	39
Figura 34 – Modelo do carregamento referente ao comboio ICE-2.....	39
Figura 35 – Talgo 350 duplo da RENFE em Savinan na linha Madrid-Tarragona (Fonte: F. Aranda – www.railpictures.net)	40
Figura 36 – Comboio Talgo adoptado nas simulações	40
Figura 37 – Modelo do carregamento referente ao comboio Talgo	41
Figura 38 – TGV duplo da SNCF a circular na linha “Sud-Est” próximo de Grésy-sur-Isère (Fonte: E.Raphael – www.pbase.com)	41
Figura 39 – Comboio TGV adoptado nas simulações.....	42
Figura 40 – Modelo do carregamento referente ao comboio TGV.....	42
Figura 41 – Thalys PBA (Paris–Bruxelas–Amesterdão) duplo da SNCF em Vémars, Paris (Fonte: F.Jolly – www.railpictures.net)	43
Figura 42 – Comboio Thalys adoptado nas simulações	43
Figura 43 – Modelo do carregamento adoptado referente ao comboio Thalys	44
Figura 44 – Comboio Virgin (EMU) a circular em Ashton, Reino Unido (Fonte: I. Leech – www.railpictures.net)	44
Figura 45 – Comboio Virgin adoptado nas simulações.....	45
Figura 46 – Modelo do carregamento adoptado no cálculo numérico, referente ao comboio Virgin ...	45
Figura 47 – Viga equivalente em elementos finitos, representativa do sistema carris-aterro, acoplado às funções de Green, para maciços estratificados	46
Figura 48 – Localização de Ledsgard, Suécia (Holm et al., 2002)	47

Figura 49 – Exemplo de um gráfico da velocidade das ondas S em função da profundidade (Adaptado de “Holm et al., 2002”).....	48
Figura 50 – Equipamento adoptado no tratamento dos solos de Ledsgard (Madshus et al., 2004)	52
Figura 51 – Tratamento aplicado em Ledsgard à base de colunas de cal/cimento: a) Planta da zona a tratar (Holm et al., 2002); b) Profundidade das colunas de tratamento (Adaptado de “Madshus et al.”, 2004)	53
Figura 52 – Amplificações observadas em Ledsgard, antes e após o tratamento do solo, para uma velocidade de circulação do comboio X2000 da ordem dos 200 km/h (Adaptado de “Madshus et al.”, 2004)	54
Figura 53 – Propriedades do maciço: a) Domínio das pequenas deformações; b) Domínio das grandes deformações.....	55
Figura 54 – Esquema de interacção: a) Ponto médio; b) Deslocamento médio	56
Figura 55 – Comparação da história temporal do deslocamento vertical da via para a velocidade de circulação de 70 km/h: a) Interacção tendo em conta o ponto médio; b) Interacção tendo em conta o deslocamento médio	56
Figura 56 – Comparação da história temporal do deslocamento vertical da via para a velocidade de circulação de 202 km/h: a) Interacção tendo em conta o ponto médio; b) Interacção tendo em conta o deslocamento médio	57
Figura 57 – Comparação da história temporal do deslocamento vertical da via para a velocidade de circulação de 185 km/h: a) Interacção tendo em conta o ponto médio; b) Interacção tendo em conta o deslocamento médio	58
Figura 58 – Gráfico das amplitudes máximas dos deslocamentos verticais no domínio das pequenas deformações para uma velocidade de circulação de 70 km/h.....	60
Figura 59 – Gráfico das amplitudes máximas dos deslocamentos verticais no domínio das grandes deformações para uma velocidade de circulação de 202 km/h.....	60
Figura 60 – Componente dinâmica do movimento ao longo da via: a) Talgo; b) ICE	61
Figura 61 – Deslocamentos verticais ao longo da via, com diferentes níveis de degradação, submetida à passagem do comboio X2000, a uma velocidade de 70 km/h.....	62
Figura 62 – Comparação da história temporal do deslocamento vertical da via, para diferentes níveis de degradação, submetida à passagem do comboio Eurostar, a uma velocidade de 70 km/h	63
Figura 63 – Passagem do comboio Thalys, a uma velocidade de 202 km/h: a) História temporal da velocidade vertical da via; b) História temporal da aceleração vertical da via.....	64
Figura 64 – Factores de amplificação dinâmica dos deslocamentos: a) Deslocamentos Positivos; b) Deslocamentos Negativos.....	65
Figura 65 – Razão entre a velocidade vertical a uma dada velocidade de circulação, com a velocidade obtida a 50 km/h: a) Velocidades Positivas; b) Velocidades Negativas	66
Figura 66 – Razão entre a aceleração vertical a uma dada velocidade de circulação, com a aceleração obtida a 50 km/h: a) Acelerações Positivas; b) Acelerações Negativas	67
Figura 67 – Função de transferência na via para uma velocidade de 202 km/h: a) Interacção tendo em conta o ponto médio; b) Interacção tendo em conta o deslocamento médio	69

Figura 68 – Comparação dos valores do espectro de função de carga do comboio Eurostar, correspondentes às funções de transferência com: a) Interação no ponto médio; b) Interação no deslocamento médio.....	70
Figura 69 – Comparação dos valores do espectro de função de carga do comboio Thalys, correspondentes às funções de transferência com: a) Interação no ponto médio; b) Interação no deslocamento médio.....	71
Figura 70 – Comparação dos deslocamentos verticais ao longo da via com interação tendo em conta o ponto (PM) e o deslocamento médio (DM): a) Eurostar à velocidade de 202 km/h; b) Thalys à velocidade de 202 km.....	72
Figura 71 – Funções de transferência para diferentes afastamentos da via para uma velocidade de circulação de 202 km/h.....	73
Figura 72 – História temporal do deslocamento vertical do terreno, à velocidade de 202 km/h, para diferentes afastamentos ao eixo da via: a) X2000; b) ICE.....	75
Figura 73 – Comparação das velocidades verticais do terreno, na vizinhança da via, à passagem do comboio X2000 à velocidade de 202 km/h: a) Y= 0 m; Y= 5 m; c) Y= 15 m; d) Y= 30 m.....	76
Figura 74 – Comparação das acelerações verticais do terreno, na vizinhança da via, à passagem do comboio X2000 à velocidade de 202 km/h: a) Y= 0 m; Y= 5 m; c) Y= 15 m; d) Y= 30 m.....	76
Figura 75 – Vista em 3D dos deslocamentos verticais na vizinhança da via, quando submetida à passagem do comboio X2000 a uma velocidade de 202 km/h.....	77
Figura 76 – Evolução do cone de mach com o aumento da velocidade à passagem do comboio X2000	78
Figura 77 – Evolução do cone de mach com o aumento da velocidade à passagem do comboio Virgin	79
Figura 78 – Propriedades do maciço no domínio das grandes deformações com semi-indefinido à cota z =-8,60 m	80
Figura 79 – Deslocamentos verticais ao longo da via à passagem do comboio ETR para semi-indefinidos com inícios em z =-8,60m e z =-14,60m.....	81
Figura 80 – Deslocamentos verticais ao longo da via, com diferentes condições de apoio, submetida à passagem do comboio X2000, a uma velocidade de 70 km/h.....	81
Figura 81 – Propriedades do maciço substituindo argila orgânica por solo do mesmo tipo da argila 182	
Figura 82 – Deslocamentos verticais máximos para o maciço alterado à passagem de comboios de AV com velocidade de circulação: a) 150 km/h; b) 175 km/h; c) 202 km/h; d) 225 km/h; e) 250 km/h; f) 275 km/h.....	86
Figura 83 – Propriedades do maciço de Ledsgard quando sujeito ao rebaixamento do Nível Freático para a cota: a) z = -1,10 m; b) z = -4,10 m; c) z = -8,60 m; d) z = -14,60 m	87
Figura 84 – Variação máxima dos deslocamentos, para diferentes posições do Nível Freático, à passagem de comboios de AV com velocidade de circulação: a) 150 km/h; b) 175 km/h; c) 202 km/h; d) 225 km/h; e) 250 km/h.....	91

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Eixos prioritários de AV em Portugal	13
Quadro 2 – Rede transeuropeia.....	14
Quadro 3 – Dados demográficos de alguns países europeus.....	15
Quadro 4 – Rede asiática de AV.....	16
Quadro 5 – Análise sintética da AV à escala mundial	17
Quadro 6 – Propriedades do maciço	49
Quadro 7 – Parâmetros do maciço	50
Quadro 8 – Propriedades da via adoptadas na simulação	50
Quadro 9 – Deslocamentos produzidos pelos comboios TGV e VIRGIN para as velocidades de circulação de 50, 202 e 225 km/h	68
Quadro 10 – Deslocamentos verticais na vizinhança da via, para uma velocidade de circulação de 202 km/h.....	74
Quadro 11 – Velocidades acelerações verticais máximas e mínimas na vizinhança da via à passagem do comboio X2000 a uma velocidade de 202 km/h	74
Quadro 12 – Deslocamentos, velocidades e acelerações ao longo da via, para o maciço sem alteração nenhuma e submetido à passagem de comboios de AV a uma velocidade de 50 km/h	83
Quadro 13 – Deslocamentos, velocidades e acelerações ao longo da via, para o maciço sem a camada de argila orgânica e submetido à passagem de comboios de AV a uma velocidade de 50 km/h.....	83
Quadro 14 – Deslocamentos máximos na via para diferentes profundidades do Nível Freático.....	91

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Alfabeto Latino

AV - Alta Velocidade

a^+ - Aceleração vertical positiva

a^- - Aceleração vertical negativa

a_j - Posição espacial do eixo j de um comboio

BEM - Boundary Element Method (Método dos Elementos de Fronteira)

BV – Banverket

b - Metade da largura da via

c - Coeficiente de amortecimento da via

DB - Deutsche Bahn

DMM - Deep mixing method

E - Módulo de deformabilidade

EI - Rigidez à Flexão da viga

EMU - Electric Multiple Unit

ETR - Elettro Treno Rápido

EUA - Estados Unidos da América

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

F_i - Força exercida pelo eixo i do comboio

FS - Ferrovie dello Stato

G - Módulo de distorção do solo

\tilde{H}_T - Função de transferência do deslocamento

ICE - Intercity-Express

k - Impedância do solo

k_1 - Imagem de Fourier na direcção longitudinal

LGV - Ligne à grande vitesse MEF - Método dos Elementos Finitos

MIT - Método dos Integrais Transformados

m - Massa por unidade de comprimento da viga

NMBS/SNCB - Nationale Maatschappij der Belgische Spoorwegen/Société Nationale des Chemins de fer Belges

P - Carga

\tilde{P} - Função de carga no domínio transformado

P_j - Força transmitida pelo eixo j de um comboio à via
RAVE - Rede Ferroviária de Alta Velocidade, SA
S&DR - Stockton and Darlington Railway
SJ - Statens Jarnvagar
SNCF - Société Nationale des Chemins de fer Français
TGV - Train à Grande Vitesse
 t - Tempo
 u - Deslocamento vertical da via
 v^+ - Velocidade vertical positiva
 v^- - Velocidade vertical negativa
 V - Velocidade de circulação dos comboios
 V_p - Velocidade das ondas P (Primárias)
 V_R - Velocidade das ondas de Rayleigh
 V_S - Velocidade das ondas S (Secundárias)

Alfabeto Grego

β - Amortecimento
 δ^+ - Deslocamento vertical positivo
 δ^- - Deslocamento vertical negativo
 ν - Coeficiente de Poisson
 ρ - Massa volúmica do solo
 $\overline{\omega}$ - Imagem de Fourier da variável temporal.

INTRODUÇÃO

Portugal enfrenta actualmente grandes desafios relacionados com a realização de grandes projectos de obras públicas, que muito irão influenciar o nosso futuro e o das gerações vindouras. Um desses projectos é precisamente a rede de Alta Velocidade Ferroviária, também vulgarmente designada de TGV.

Este meio de transporte representa actualmente, no mercado global do século XXI, uma elevada importância na medida em que torna mais fácil e eficiente a mobilidade de pessoas e bens. Admite-se que este ponto de vista é indispensável para o crescimento económico e de particular importância para a coesão social. Existe uma série de objectivos e prioridades consideradas de extrema importância para a concretização de uma rede de AV, destacando-se a reestruturação da competitividade dos transportes ferroviários, o desenvolvimento de novos mercados, a inserção na Rede Ferroviária transeuropeia, a redução dos tempos e custos de viagem, as condições eficientes de mobilidade e a redução de consumos de energia, congestionamentos, emissões de gases e acidentes. As infra-estruturas da rede de AV fazem parte integrante desse desafio, na medida em que, são delineadas, analisadas e dimensionadas de modo a atender a esses diferentes factores.

No entanto, as elevadas velocidades alcançadas por comboios de AV, associadas às condições geotécnicas das zonas atravessadas, podem estar na origem de fenómenos dinâmicos capazes de prejudicar o correcto funcionamento do sistema da rede de AV.

O principal objectivo deste trabalho pretende precisamente analisar a influência, que as condições de fundação de um terreno possam exercer ao nível do comportamento dinâmico de uma ferrovia.

O presente trabalho, para além desta introdução, foi organizado em diversos capítulos, de acordo com o que passa a descrever.

No Capítulo 2 faz-se uma breve contextualização histórica dos caminhos-de-ferro e uma análise ao estado actual e evolutivo do panorama da AV, em Portugal e no mundo.

No Capítulo 3 apresenta-se sucintamente a problemática dos efeitos dinâmicos em linhas de AV e algumas referências a modelos plausíveis de serem utilizados para prevenir esses fenómenos. É dada mais ênfase ao MIT (Método dos Integrais Transformados) uma vez que é este o mecanismo de cálculo aplicado na análise do caso de obra.

O Capítulo 4 refere-se à apresentação da obra que foi objecto de estudo, assim como da sua modelação pelo Método dos Integrais transformados. São ainda realizados estudos paramétricos variando algumas das características que podem influenciar o comportamento dinâmico da via-férrea, quando submetida à passagem de diferentes comboios de AV.

Finalmente, no Capítulo 5, incluem-se algumas considerações finais nas quais se resumem as conclusões mais relevantes do presente trabalho e onde se propõe algumas situações de desenvolvimento futuro.

2

DESCRIÇÃO GERAL DA EVOLUÇÃO DAS REDES FERROVIÁRIAS

2.1 BREVE ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DOS CAMINHOS-DE-FERRO

A 27 de Setembro de 1825, circulou em Inglaterra entre Stockton e Darlington, o primeiro comboio no mundo.

Apesar de ser inicialmente adoptado nas linhas de carvão, o caminho-de-ferro rapidamente passou para os grandes meios, desenvolvendo-se e espalhando-se para fora das minas. O caminho-de-ferro foi como que a ignição para o desenvolvimento rápido na transição de um meio de transporte lento e limitado dos minérios para os passageiros, vindo já em 1835 a atingir os 100 km/h (CP, 2009). Este meio de transporte era líder do sector de transportes terrestres, detendo um monopólio efectivo.

Na primeira metade do século XIX, não existiam em Portugal estradas nem sequer bons caminhos. De liteira, demorava-se pelo menos cinco dias para ir de Lisboa para o Porto enquanto que uma simples carta precisava de oito dias para chegar a Bragança (RTP, 2009). Esta carência de infra-estruturas associada à necessidade de quebrar o isolamento cultural e económico de séculos, levou a que Fontes Pereira de Melo financiasse a construção da primeira linha de caminho-de-ferro em Portugal (RTP, 2009). A construção desta linha, iniciada em 1853, ficou a cargo da Companhia Central e Peninsular dos Caminhos-de-ferro em Portugal. Em 28 de Outubro de 1856, depois de muitas intenções e de muitos projectos, foi finalmente inaugurada em Portugal, por D. Pedro V, a primeira linha de Caminho-de-Ferro de Lisboa ao Carregado (APAC, 2009). Este acontecimento marcou um ponto de viragem na história de Portugal.

O troço entre Lisboa e o Vale de Santarém foi inicialmente estabelecido em bitola Europeia (1,435 mm). Porém, a partir da localidade de vale d'Asseca em direcção à fronteira espanhola, tomou-se a drástica decisão de alterar a bitola para a que já existia do lado espanhol, conhecida como bitola ibérica (1,665 / 1,668 mm) para que pudesse haver uma continuidade entre os dois países. Foram anos e anos de construções, que permitiram atingir a fronteira espanhola em 1863 (pela linha do leste – via Elvas) e o Porto, segunda cidade do país, apenas em 1877, depois de vencida a dificuldade do atravessamento do rio Douro. Estabeleceram-se depois durante anos as restantes linhas, pelo país fora, que permitiram que o comboio chegasse a quase todo o país, vindo ainda a entrar em Espanha por outras fronteiras. Em zonas menos acessíveis, acabou por se estabelecer também linhas férreas, mas na bitola métrica (1,000 mm), como foi o caso dos vales dos rios Vouga, Tua e Corgo (Para Ferroviário Fórum, 2009).

Os caminhos-de-ferro, também conhecidos por ferrovias, foram os primeiros meios de transporte de massas existentes até ao desenvolvimento do automóvel no início do século XX. Nas décadas após a

Segunda Guerra Mundial, este meio de transporte sofreu uma queda na sua utilização. O baixo custo do petróleo associado aos substanciais avanços no sector automóvel e a criação de infra-estruturas rodoviárias, mais concretamente auto-estradas, a aviação, etc., foram algumas das razões que estiveram na origem desse acontecimento. No entanto, tanto na Europa como no Japão, foram reconstruídos inúmeros quilómetros de via-férrea, enquanto que nos Estados Unidos, foi dado ênfase à construção de um enorme sistema de auto-estradas interestaduais e aeroportos. Os sistemas de transporte de massas foram severamente negligenciados nos EUA. Os caminhos-de-ferro dos Estados Unidos foram-se tornando cada vez menos competitivos, em parte devido à tendência do governo em favorecer o transporte aéreo e rodoviário. Este factor também se fez sentir em grande parte devido à menor densidade populacional existente nos Estados Unidos ao contrário do Japão e da Europa (Wikipédia, 2008).

Em meados dos anos 50 do século XX, com o aparecimento do transporte aéreo, inaugurou-se em Portugal, um serviço “Foguete” entre as duas principais cidades do país, com vista a reduzir tempos de viagem e conquistar passageiros perdidos para o novo meio de transporte. Este serviço, com as naturais remodelações acabaria por se manter até aos nossos dias, passando a ser exercido por comboios de pendulação activa, designados por “Alfa Pendular” (Para Ferroviário Fórum, 2009).

Actualmente, os caminhos-de-ferro são um dos meios de transporte terrestre com maior capacidade de transporte de carga e de passageiros (Wikipédia, 2008). A crescente necessidade de mobilidade e o consequente aumento da procura das ferrovias, aliado ao avanço das novas tecnologias, resultou num novo conceito de transportes, denominado por “Alta Velocidade”. Este sistema de transporte tem vindo a evoluir substancialmente ao longo do tempo, como se poderá ver mais adiante neste trabalho.

2.2 CONSTITUIÇÃO DE UMA VIA-FÉRREA

2.2.1 SUBESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA

A maioria das vias-férreas é formada por dois carris paralelos entre si, geralmente feitos em aço, dispostos perpendicularmente sobre travessas de madeira, metálicas ou de betão. Estes elementos, que compõem a superestrutura da via-férrea, encontram-se assentes numa subestrutura, que pode ser do tipo balastrada ou não balastrada.

A via balastrada (Figura 1) é uma solução estrutural que, pelas suas características, tem um bom comportamento dinâmico relativamente aos esforços provocados pelas massas suspensas – veículos que estão apoiados no respectivo eixo por uma suspensão primária, a qual, entre outras funções, deve contribuir para isolar essas elevadas massas e promover a dissipação de energia – e as não suspensas, que são as que constituem as rodas, o eixo e todas as peças ou equipamentos a eles rigidamente ligados, cujo comportamento depende essencialmente das características mecânicas da via (Fortunato, 2005).

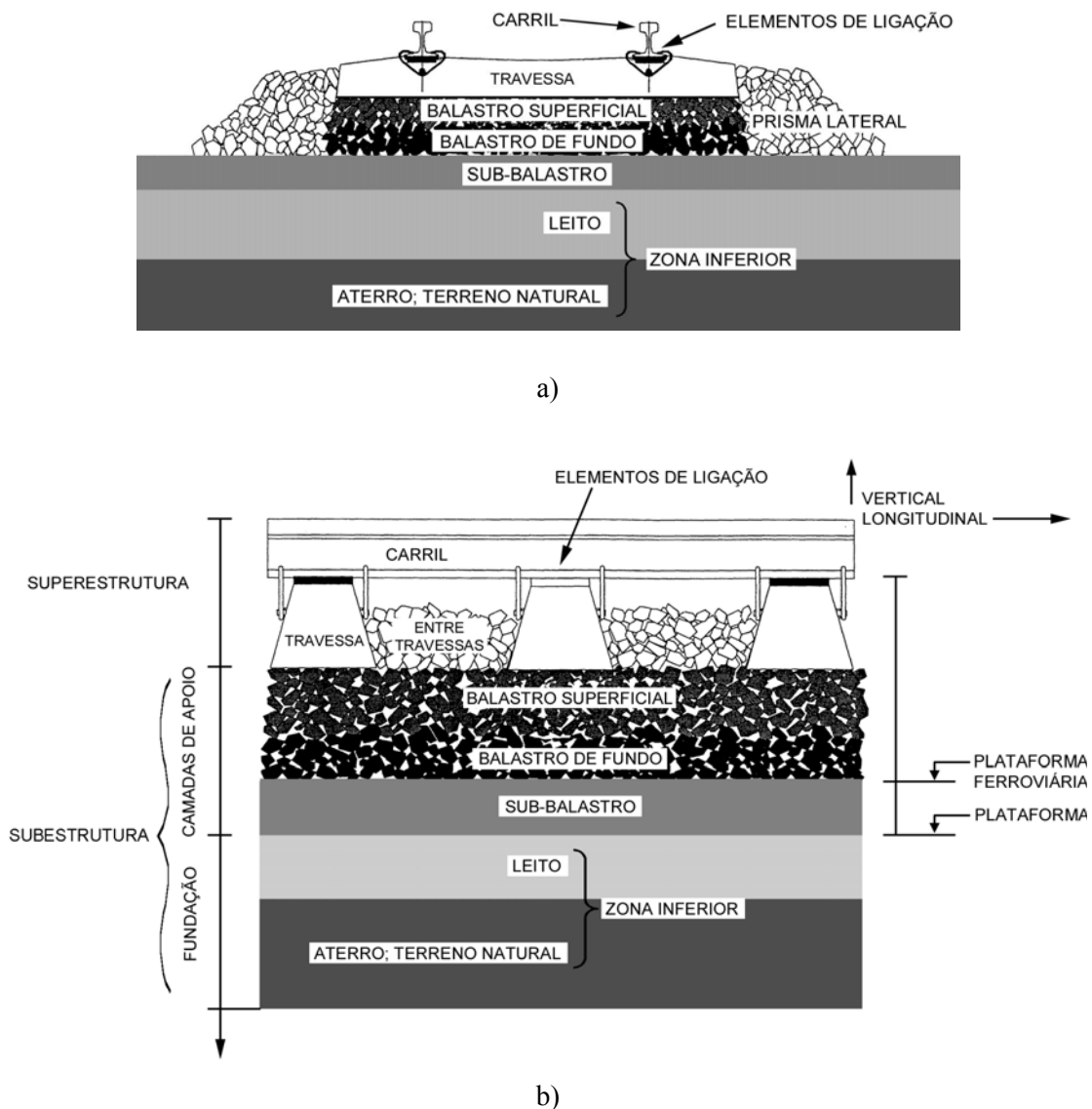


Figura 1 – Esquema estrutural da via balastrada: a) perfil transversal; b) perfil longitudinal (Fortunato, 2005)

Os elementos da superestrutura e o balastro são elementos de desgaste mais ou menos elevado, com a passagem do tráfego. O sub-balastro e a plataforma têm, normalmente, uma duração mais elevada, que pode ser da ordem de 50 a 100 anos, desde que sejam convenientemente realizados os trabalhos de conservação e reabilitação da superestrutura, da subestrutura e de drenagem (Fortunato, 2005).

A camada de balastro desempenha um papel fundamental no comportamento da via, quer no que se refere à estabilidade vertical, quer relativamente à estabilidade horizontal. O balastro resiste às forças com componente vertical pela resistência directa das partículas de balastro. As forças laterais e longitudinais são equilibradas pelo atrito que se gera entre as partículas de balastro e as travessas, e pelo embricamento das partículas de balastro (Fortunato, 2005). Vulgarmente são adoptados como materiais para o balastro o basalto, o granito, a escória de alto-forno, o calcário e a brita graduada

Habitualmente divide-se a camada de balastro em:

- Balastro entre travessas;
- Prisma lateral;
- Balastro superficial, que constitui a sub-camada superior que é afectada directamente durante as acções mecânicas de conservação;
- Balastro de fundo, que constitui a sub-camada inferior e que, geralmente, ao fim de alguns anos de exploração se encontra com uma granulometria relativamente distinta da inicial.

A camada de balastro deve desempenhar diversas funções, nomeadamente:

- Servir de apoio às travessas;
- Resistir às acções verticais, laterais e longitudinais aplicadas às travessas, com o objectivo de manter a via no alinhamento correcto;
- Promover a absorção de vibrações;
- Permitir o escoamento de material poluente proveniente do material circulante;
- Facilitar as operações de conservação relacionadas com o nivelamento e o alinhamento da via, devido à possibilidade de arranjo das partículas de balastro;
- Permitir o escoamento das águas da chuva que caem na via;
- Evitar o aparecimento de vegetação;
- Minimizar os efeitos das acções climáticas (chuva e gelo) sobre as camadas subjacentes;
- Reduzir a tensão transmitida pelas travessas às camadas subjacentes e fazer essa transferência da forma mais uniforme possível.

Relativamente a camada de sub-balastro, interposta entre a camada de balastro e a fundação, aparece devido à necessidade de proteger a plataforma e para reduzir o nível de tensão nos solos, mantendo constante a espessura do balastro. Esta espessura, em geral, é estabelecida à partida e convém que seja constante ao longo de toda a linha, para possibilitar, durante as operações de conservação e reabilitação, uma utilização sistemática dos equipamentos mecânicos (Fortunato, 2005).

O número de camadas que constitui o sub-balastro, as suas espessuras e características são função:

- Dos materiais utilizados na construção;
- Da natureza e propriedades da fundação, nomeadamente o tipo de material e as suas características mecânicas, a sua susceptibilidade em relação à água e o seu estado de compactidade;
- Das condições climáticas e hidrogeológicas do local;
- Do tráfego (carga, velocidade e frequência de passagem);
- Da superestrutura da via (tipo de carril, tipo e espaçamento das travessas, etc.).

A camada de sub-balastro, colocada sobre a fundação, tem algumas funções que podem ser também desempenhadas pelo balastro, nomeadamente:

- Reduzir as tensões impostas pelo material circulante para níveis aceitáveis na fundação;
- Proteger a fundação contra as acções do gelo.

No entanto, a camada de sub-balastro tem outras funções específicas, como sejam:

- Promover a separação entre o balastro e a fundação, evitando assim a interpenetração e a migração do material fino;
- Evitar o desgaste da fundação pela acção mecânica do balastro, essencialmente em presença de água, que pode provocar a formação de lamas, as quais, por acção das cargas dinâmicas, podem ser bombadas para a superfície;
- Funcionar como camada impermeabilizante, evitando que as águas que caem no balastro cheguem à fundação;
- Funcionar como elemento drenante e filtrante, em relação à plataforma, permitindo que se escoem as águas que ascendem da fundação, mas evitando que haja passagem de elementos finos para o balastro.

Em geral exige-se que o sub-balastro seja pouco deformável (módulo de deformabilidade elevado) e tenha baixa permeabilidade. Normalmente utilizam-se materiais naturais bem graduados, areias cascalhentas, compostas em central, materiais naturais britados ou detritos de pedreiras. As partículas devem ter boa resistência ao desgaste e a sua granulometria deve poder proporcionar as funções de filtro e de separação entre o balastro e a fundação (Fortunato, 2005).

O outro tipo de subestrutura de via-férrea, a via não balastrada, surgiu da busca de um modelo de estrutura de via que garantisse a estabilidade da circulação dos veículos com conforto e segurança, requerendo pouca conservação. Teoricamente, os trabalhos de conservação de uma via sem balastro limitam-se à substituição dos carris com desgaste excessivo, das peças de fixação deterioradas por fadiga e os elementos de apoio resiliente envelhecidos, sempre e quando o desempenho destes elementos afecta a qualidade da circulação. Em termos económicos pode ser uma solução particularmente interessante, quando aplicada em vias novas, ou a renovar, nas quais haja constrangimentos físicos consideráveis, como por exemplo uma elevada percentagem de obras de arte (túneis e viadutos), relativamente ao desenvolvimento total, o que leva à existência de muitas transições difíceis de construir e de conservar (Fortunato, 2005).

2.2.2 SUPERESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA

Todos os componentes da via são fundamentais para o bom funcionamento do sistema ferroviário. No entanto, os carris são aqueles que estão sujeitos a maiores níveis de tensões, daí ser fundamental um controlo adequado destes elementos. Este aspecto é indispensável de modo a otimizar a eficiência do sistema ferroviário para consequentemente obter menores perdas energéticas. Os carris são de aço e têm como funções suportar e transferir para as travessas as cargas dos veículos e impor a direcção às rodas dos comboios, num plano. Estes elementos têm que ter a rigidez suficiente para funcionar como vigas que transferem as cargas concentradas das rodas para as travessas – as quais funcionam como apoios afastados de determinado comprimento – sem flexão excessiva (Fortunato, 2005).

Os elementos de ligação, como se pode ver na Figura 2, devem promover o apoio adequado dos carris e a fixação destes às travessas, resistindo aos esforços originados pelas acções verticais, laterais, longitudinais e de torção (transmitidas pelas rodas), e aos esforços produzidos pelas variações de temperatura dos carris. Além disso, devem ainda reduzir as tensões e as vibrações causadas pelas cargas dinâmicas. O tipo de ligação e as características dos elementos de ligação e de apoio estão relacionados com o tipo de travessa de cada via. Em travessas de madeira interpõe-se apoios metálicos (chapins) entre os carris e as travessas, os quais asseguram tensões admissíveis e protegem a madeira

contra o desgaste mecânico. Em travessas de betão colocam-se elementos resilientes para amortecer as vibrações provocadas pelas rodas, para reduzir o atrito entre o carril e a travessa e para promover o isolamento eléctrico dos circuitos da via (Fortunato, 2005).

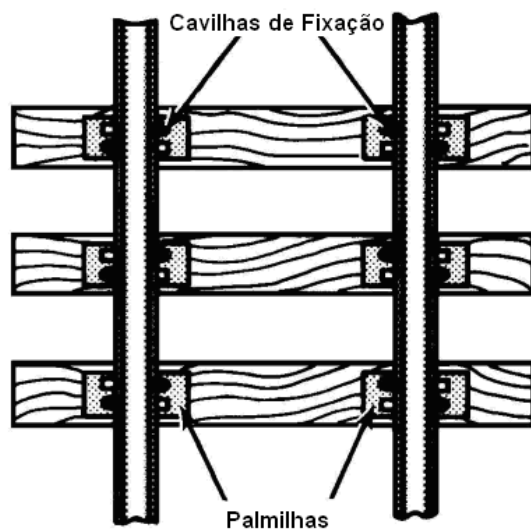


Figura 2 – Elementos de fixação dos carris

(Adaptado de GlobalSecurity.org – www.globalsecurity.org)

As travessas são os elementos da via colocados entre os carris e o balastro. Independentemente da sua forma, dimensões, ou composição, estas desempenham várias funções necessárias para um adequado funcionamento da via-férrea. As principais funcionalidades das travessas são repartir as cargas verticais provenientes das passagens dos comboios e transmiti-las à base de suporte da via, como por exemplo, o balastro. As superfícies das travessas são lisas para que os carris possam ser fixados em devidas condições, aumentando desta forma o impedimento de movimentos verticais, laterais e longitudinais dos carris.

A travessa localizada imediatamente por baixo da roda recebe a maior percentagem de carga, como se pode ver na Figura 3, sendo a restante distribuída pelas travessas adjacentes.

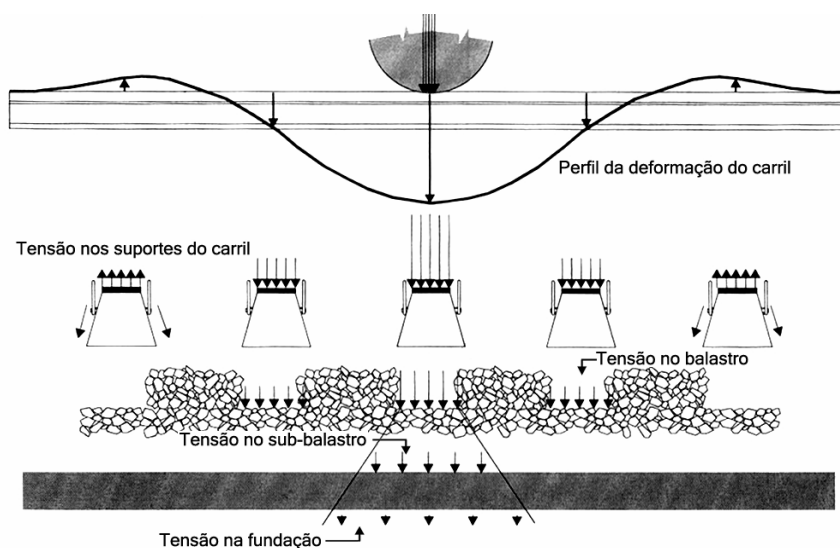


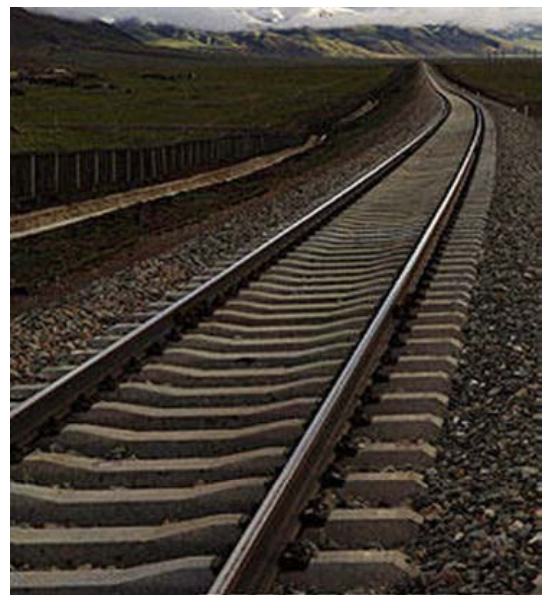
Figura 3 – Distribuição das tensões nas travessas da via-férrea (Fortunato, 2006)

Segundo Fortunato (2005), as travessas têm que dispor de uma adequada resistência mecânica, quer na direcção vertical quer na horizontal.

Em geral, as travessas são de madeira (Figura 4a) ou de betão armado pré-esforçado (Figura 4b). As travessas de madeira são cortadas a partir de árvores resinosas e folhosas. Estas travessas são submetidas a um tratamento para prevenir o ataque de xilófagos, fungos, insectos e outras bactérias. As travessas em betão dispõem sensivelmente das mesmas dimensões que os elementos de madeira, no entanto apresentam uma massa cerca duas vezes superior. A maior parte das travessas de betão dispõem de zonas para fixar as palmilhas que servirão para amortecer o impacto entre as travessas e os carris. Estas áreas de fixação são as zonas mais sensíveis dos elementos. Existem ainda as travessas em aço. Apesar de não serem tão habituais, estes elementos apresentam uma elevada rigidez e resistência mecânica. Estes elementos são fabricados em diversos formatos com diferentes características, sendo alguns dotados de um sistema de fixação integrado. Estes elementos são raramente utilizados em vias que dispõem de um sistema alimentado à base de energia eléctrica.



a)



b)

Figura 4 – Ferrovia: a) Com travessas de madeira; b) Com travessas em betão

(Fonte: Wikimedia Commons); (Fonte: China Digital Times)

2.3 LINHAS DE ALTA VELOCIDADE

2.3.1 EVOLUÇÃO DAS REDES DE ALTA VELOCIDADE

A evolução de um meio de transporte justifica-se quando este apresenta competitividade no mercado dos transportes. A competitividade dos meios de transportes depende do custo necessário para transportar mercadorias e pessoas. As viagens de comboio tornam-se mais competitivas nas áreas de maior densidade populacional e nos períodos em que o custo do petróleo for mais elevado, devido ao facto de os comboios terem consumos de combustível mais eficientes que os carros, embora algumas vezes menos eficientes que os autocarros. Muito poucos comboios consomem diesel ou outros combustíveis fósseis, mas as centrais eléctricas que fornecem electricidade aos comboios eléctricos consomem normalmente gás natural e carvão. No entanto, no Japão e na França, existe uma grande proporção de electricidade proveniente de energia nuclear. Mesmo consumindo electricidade gerada a

partir de carvão e petróleo, os comboios são mais económicos por passageiro por quilómetro percorrido do que um automóvel típico (Wikipédia, 2008).

A actualização das redes ferroviárias exige elevados investimentos e por isso só é competitiva com os aviões ou automóveis desaparecendo os subsídios ao custo do combustível, como por exemplo nos EUA, ou face a altas densidades populacionais como se passa na Europa e Japão (Wikipédia, 2008). O transporte ferroviário é predominante nas regiões altamente industrializadas, como a Europa, o extremo leste da Ásia e ainda em locais altamente populosos como a Índia (Wikipédia, 2008).

Actualmente, as renovações viárias são na maioria das vezes submetidas a estudos de seriação de critérios, sendo eles do tipo socio-económicos, financeiros, ambientais, etc, com o objectivo de transitar o serviço convencional para um uso de alta velocidade.

À escala mundial já existem alguns projectos e sistemas operacionais na área da AV, como se pode observar na Figura 5, destacando-se evidentemente a Europa e o Japão pelas razões enunciadas anteriormente.

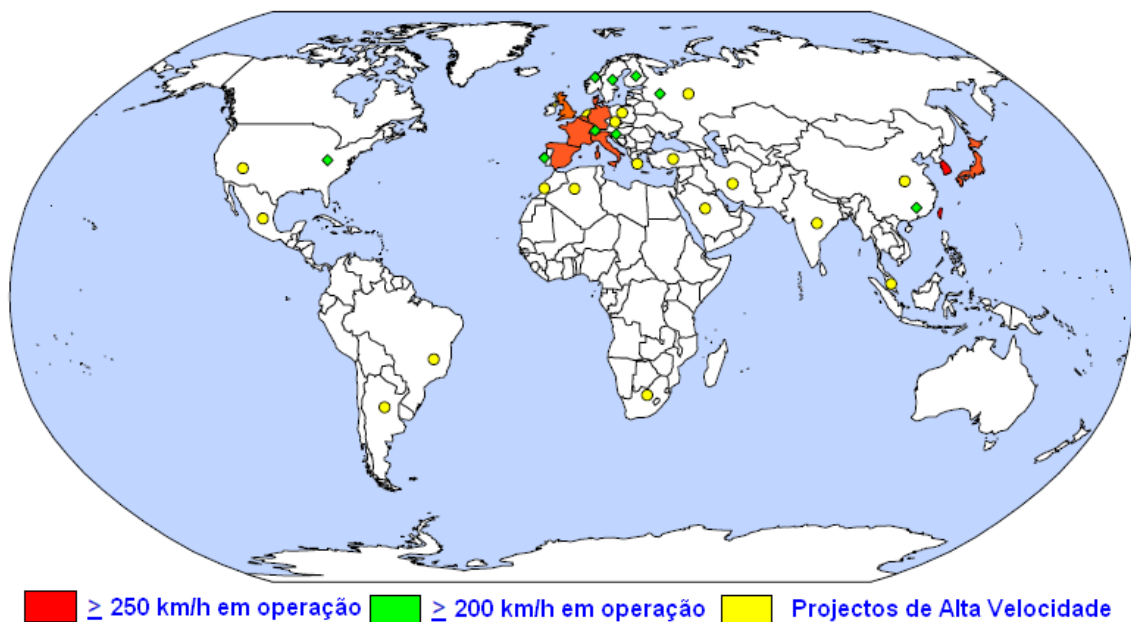


Figura 5 – Alta Velocidade no mundo

(Adaptado de UIC - www.uic.asso.fr)

Os comboios de AV foram concebidos para recuperar os passageiros de comboios perdidos para outros meios de transporte, tendo em muitos casos sido muito bem sucedidos nos seus objectivos (Wikipédia, 2008). O primeiro sistema de caminhos-de-ferro de AV foi o japonês Shinkansen na linha Tokaido – Shinkansen, lançado oficialmente em 1964. Na Europa este foi apenas introduzido em 1981, mais concretamente em França, através da linha LGV Sud Est que estabelece a ligação Paris – Lyon. No entanto foi em Itália em 1978 que entrou em circulação o primeiro comboio de AV, designadamente no traçado Roma – Florença mais conhecido por “Direttissima”.

No final dos anos 80 e princípio dos anos 90 foram realizados em Portugal os primeiros estudos sobre ligações ferroviárias em AV. Estes estudos decorreram da necessidade de integração europeia do nosso caminho-de-ferro de forma articulada com a introdução da AV ferroviária (RAVE, 2009).

A XIX Cimeira Ibérica, realizada a 7 e 8 de Novembro de 2003, formalizou a decisão política de implantar a Rede Ferroviária de AV como solução para as necessidades de mobilidade de pessoas e bens dentro e fora do país. Foram definidos os pontos de ligação à fronteira e o cronograma para a execução das respectivas ligações. Foi acordado entre os dois governos a concretização de quatro ligações transfronteiriças entre Portugal e Espanha a AV: Porto-Vigo, Aveiro-Salamanca, Lisboa-Madrid (via Badajoz) e Faro-Huelva (RAVE, 2009).

O Projecto Nacional de AV é peça integrante da Rede Transeuropeia de Transporte Ferroviário, respeitando no seu desenvolvimento e, naturalmente nas fases intermédias, todas as exigências comunitárias no que se refere à criação de efectivas condições de interoperabilidade. A futura Rede de AV, toda em bitola europeia, irá ligar os principais centros de mobilidade de pessoas e bens da Península Ibérica e da restante Europa. A rede é composta essencialmente por um Corredor Litoral entre a Galiza e Lisboa que se articula com as restantes ligações: uma, a Norte, em direcção a Salamanca – Bordéus, designado por Ramo Atlântico e outra a Sul, em direcção a Évora, Elvas/Badajoz – Madrid – Barcelona – Marselha - que se designa como o Ramo Mediterrânico, tendo ainda prevista a ligação, a partir de Évora, a Faro/Huelva, como se pode ver na Figura 6 (RAVE, 2009).

O actual Governo definiu como eixos prioritários, as ligações Porto-Vigo, e Lisboa-Madrid, com entrada em funcionamento em 2013 e Lisboa-Porto, com entrada em funcionamento em 2015 (MOPTC, 2009).

A decisão de construir uma rede ferroviária de AV em Portugal, em particular nos eixos prioritários, é uma decisão estratégica e de maior importância para o futuro do País e como tal tem sido considerada por todos os Governos, em particular desde 2004. De facto, trata-se de ligar as principais cidades portuguesas e europeias e de garantir uma aproximação entre os principais centros populacionais e económicos portugueses, onde a distância física já não é hoje o factor decisivo para a competitividade, mas sim o binómio distância-tempo (MOPTC, 2009).



Figura 6 – Rede da AV prevista para Portugal

A ligação Lisboa-Porto permitirá ligar 70% da população e da economia portuguesa em tempos de percurso na ordem de 1h30, garantindo-se a ligação directa em 1h15. Quanto à ligação Porto-Vigo, destinada a mercadorias e passageiros, constitui uma opção fundamental para potenciar o desenvolvimento de toda a região Norte Peninsular, ligando Porto e Vigo em 60 minutos, quando hoje a ligação ferroviária se faz em 3h30m. Trata-se de um investimento estratégico que potencia a utilização de outras infra-estruturas de transportes da região, como sejam o Porto de Leixões, o Aeroporto Francisco Sá Carneiro e as Plataformas Logísticas, criando uma dinâmica de desenvolvimento de toda a região Norte. Para a ligação Lisboa-Madrid, o Governo acordou com Espanha, em 2005, a construção de uma linha destinada a mercadorias e passageiros, com um tempo de ligação directa, para passageiros, de 2h45m e uma velocidade de projecto de 350 km/h (MOPTC, 2009). No Quadro 1 é possível observar as principais características dos eixos prioritários de AV a executar em Portugal.

Quadro 1 – Eixos prioritários de AV em Portugal

Ligação	Lisboa-Madrid	Porto-Vigo	Lisboa-Porto
Tráfego	Misto	Misto	Passageiros
Tempo de Viagem	2h45m	1h00m	1h15m
Velocidade de Projecto (km/h)	350	250	300
Extensão em Portugal (km)	203	100	292
Extensão total (km)	640	125	292
Investimento (Milhões de €)	2400	1400	4500
Entrada em Serviço	2013	2013	2015
Procura (Milhões de Passageiros)	9,4	3,7	12,2

A rede transeuropeia dispõe actualmente de diversas ligações, algumas em operação, outras em construção e ainda um leque enorme em fase de projecto. A Figura 7 ilustra o estado actual da rede transeuropeia com a expansão prevista.

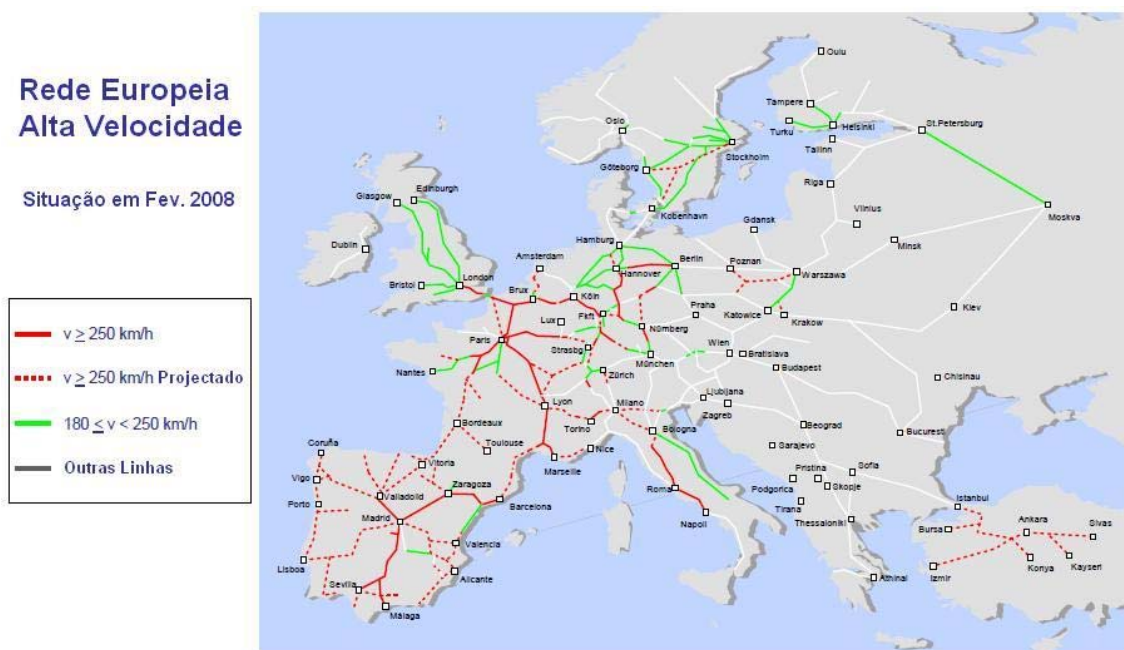














Figura 7 – Estado actual da rede transeuropeia

(Adaptado de UIC - www.uic.asso.fr)

A UIC efectuou em Junho de 2008, um levantamento do estado actual e futuro da rede de AV na Europa e no Mundo. Na Europa prevê-se um enorme investimento nesta área prevendo-se uma ampliação da rede actual em cerca de 300 por cento até 2025. Os anexos A.1, A.2 e A.3 expõem informações sobre as linhas europeias de AV em operação, em construção e em projecto, respectivamente. No Quadro 2 é possível constatar a contribuição dos diferentes países europeus relativamente ao alargamento da rede europeia.

Quadro 2 – Rede transeuropeia





País	Operacional (km)	Construção (km)	Projecto (km)	Em 2025 (km)
 Alemanha	1285	378	670	2333
 Bélgica	137	72	0	209
 Espanha	1594	2219	1702	5515
 França	1872	299	2616	4787
 Itália	562	314	395	1271
 Países Baixos	0	120	0	120
 Polónia	0	0	712	712
 PORTUGAL	0	0	1006	1006
 Rússia	0	0	650	650
 Suécia	0	0	750	750
 Suíça	35	72	0	107
 Reino Unido	113	0	0	113
Total (EUROPA)	5598	3474	8501	17573

O projecto português de AV contempla a construção de 1006 km de linha de AV até 2025. A partir do Quadro 2 é possível estimar o incremento médio da rede europeia em cerca de 704,41 km por ano correspondendo a uma taxa de crescimento média anual de 5,88 %.

$$CMA_{\text{Europa}} = \frac{17573 - 5598}{2025 - 2008} = 704,41(\text{km/Ano}) \quad (1)$$

Em alguns países, tais como, Portugal, Suécia, Polónia e Rússia, verifica-se que existe uma inicialização total nesta área. Destes países aderentes é possível constatar que Portugal é aquele que apresenta a extensão de rede mais elevada. A título de curiosidade apresenta-se no Quadro 3 algumas informações sobre a demografia de cada país, de modo a poder ter a noção do investimento que cada um deles irá efectuar em função da população. Apesar da Polónia dispor de um número de habitantes e uma densidade populacional superior a Portugal, a extensão de rede de AV em projecto até 2025 é cerca de 30 % inferior.

Quadro 3 – Dados demográficos de alguns países europeus

País	Área (km ²)	População (hab)	Densidade (hab/km ²)	AV em 2025 (km)
 PORTUGAL	92.391	10.631.800	115,1	1006
 Suécia	449.964	9.276.509	20,6	750
 Polónia	317.679	38.130.300	120,0	712
 Rússia	17.075.200	141.812.991	8,3	650

Em 2025 prevê-se que se encontre operacional cerca de 18.000 km de linhas de AV em toda a Europa. Todas estas linhas constituirão a rede que aparece ilustrada na Figura 8.

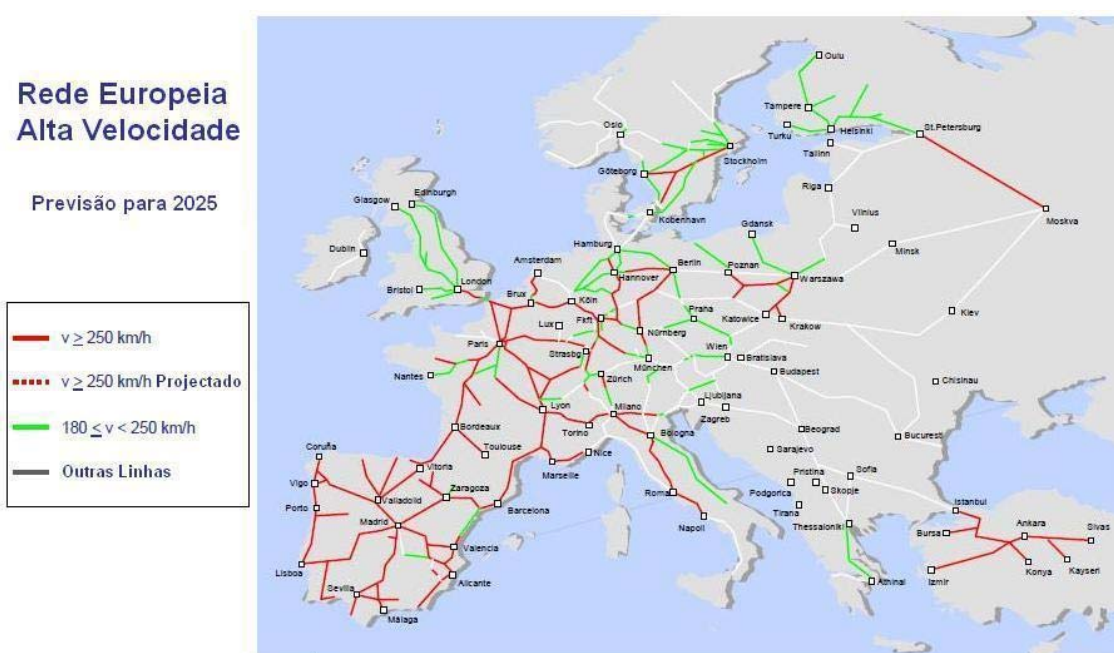


Figura 8 – Previsão da rede transeuropeia para 2025









(Adaptado de UIC - www.uic.asso.fr)

Na Ásia também se prevêem grandes transformações até 2025 com um crescimento da rede em cerca de 400 por cento. Existe uma evidente aposta por parte da República Popular da China na AV, procurando estabelecer ligações rápidas à capital Pequim, criando para tal, duas ligações muito extensas (Xangai e Wuhan). O enorme investimento por parte deste país contribuirá em cerca de 50 por cento para a rede asiática. Os anexos A.4, A.5 e A.6 expõem informações sobre as linhas asiáticas de AV em operação, em construção e em projecto, respectivamente.

Neste continente também se verifica grandes investimentos nesta área, com adesão de novos países, tais como, a Arábia Saudita, a Índia, o Irão e a Turquia, estando este último numa fase mais avançada, uma vez que já dispõe de traçados em construção, enquanto que os restantes apenas se encontram na fase de projecto.

No Quadro 4 encontra-se exposto uma síntese do estado actual e futuro da rede asiática de AV.

Quadro 4 – Rede asiática de AV

País	Operacional (km)	Construção (km)	Projecto (km)	<u>Em 2025</u> (km)
 Arábia Saudita	0	0	550	550
 Coreia do Sul	330	82	0	412
 Índia	0	0	495	495
 Irão	0	0	475	475
 Japão	2452	590	583	3625
 Rep. China (Taiwan)	345	0	0	345
 Rep. Pop. China	832	3404	4075	8311
 Turquia	0	745	1679	2424
Total (ÁSIA)	3959	4821	7857	16637

A partir do Quadro 4 é possível determinar o crescimento médio da rede asiática que é aproximadamente 745,76 km por ano.

$$CMA_{\text{Ásia}} = \frac{16637 - 3959}{2025 - 2008} = 745,76(\text{km/Ano}) \quad (2)$$

Nos restantes continentes, existem também alguns progressos na área da AV, com uma linha operacional nos EUA e com projectos delineados na Argentina, Brasil, Marrocos e EUA, como se pode constatar pelo anexo A.7.

A partir de todos estes dados, é possível efectuar um balanço à escala global. É previsível que o crescimento médio da rede de AV mundial seja superior ao crescimento europeu e asiático, uma vez que neste se insere a contribuição dos restantes continentes que a partida não detinham quaisquer ligações de AV, tanto operacionais como em projecto, à excepção dos EUA.

$$CMA_{\text{Mundial}} = \frac{36967 - 9919}{2025 - 2008} = 1591,06(\text{km/Ano}) \quad (3)$$

Quadro 5 – Análise sintética da AV à escala mundial

País	Operacional (km)	Construção (km)	Projecto (km)	Em 2025 (km)
Europa	5598	3474	8501	17573
Ásia	3959	4821	7857	16637
Restantes Continentes	362	0	2395	2757
Total (Mundo)	9919	8295	18753	36967

Do ponto de vista do panorama nacional, é possível admitir-se que a contribuição de Portugal, até 2025, para a Rede de AV Europeia e Mundial é de 5,72 % e 2,72 %, respectivamente.

$$P_{PTE} = \frac{1006}{17573} \times 100 = 5,72\% \quad (4)$$

$$P_{PTM} = \frac{1006}{36967} \times 100 = 2,72\% \quad (5)$$

Estas percentagens reportam à extensão total de rede, a implementar em Portugal. Evidentemente, numa fase inicial, contabilizando apenas os eixos prioritários, estas percentagens diminuem de 5,72 % e 2,72 % para 3,39 % e 1,61 %, respectivamente. Apesar desta parcela de investimento ser bastante inferior, continua a ter impacto considerável na economia nacional.

2.3.2 CARACTERIZAÇÃO DE UMA LINHA DE ALTA VELOCIDADE

Uma linha de alta velocidade é uma via ferroviária construída para ser submetida a velocidades de circulação de comboios de ordem superior às vias-férreas convencionais. Segundo a UIC (Union Internationale des Chemins de Fer), não existe um termo único ou uma definição padrão de alta velocidade ferroviária. As definições variam consoante as mais diversas situações, uma vez que cada caso também representa uma complexidade real diferente. Para combater a complexidade do conceito de AV, a União Europeia propôs, através da directiva 96/48, uma definição mais ampla que permite de uma certa forma englobar um vasto conjunto de sistemas. No Anexo 1 dessa directiva é possível encontrar uma definição de AV em função de 3 aspectos, que são, as infra-estruturas, material circulante e por fim a coerência que tem de existir entre esses dois conceitos.

Em termos das infra-estruturas, a definição de AV abrange uma vasta gama de configurações. É actualmente designada por linha de AV aquela que for projectada para permitir a circulação de comboios a velocidades superiores a 250 km/h em todo o percurso, ou pelo menos numa fracção significativa desse mesmo trajecto. Qualquer linha, sendo ela nova ou reabilitada que permita a circulação de comboios até 200 km/h, pode ser considerada como uma linha de AV desde que consiga atender a critérios específicos, como por exemplo, redução substancial dos tempos de viagem. Na óptica da infra-estrutura, a AV engloba todo o tipo de circulação possível sobre linhas de AV, independentemente do material circulante adoptado.

Do ponto de vista do material circulante, mais concretamente os comboios de AV, estes são normalmente compostos por carruagens e automotoras, sendo por vezes até simétricos, de modo a formar ramos múltiplos. Estes comboios têm a capacidade de atingir uma velocidade de 250 km/h em serviço comercial. Em certas situações, os comboios deste género podem circular a velocidades inferiores (200 km/h), oferecendo no entanto um serviço de elevada qualidade, levando a classificar-se os comboios pendulares como sendo comboios de AV.

Quanto a coerência entre as infra-estruturas e o material circulante, esta tem de existir de modo a que se obtenha um bom nível de desempenho, segurança, qualidade dos serviços e por fim redução de custos.

A UIC distingue ainda outro aspecto importante, para além das infra-estruturas e o material circulante, que é metodologia de exploração do sistema. Deste ponto de vista, a definição do conceito de AV pode aparentar uma certa complexidade, na medida que as próprias empresas gestoras das infra-estruturas assim como as operadoras dispõem da sua própria opinião sobre o assunto. Actualmente, ainda não é possível harmonizar os conceitos defendidos pelos diversos intervenientes do sector ferroviário. Isto demonstra a razão da complexidade na exploração de dados estatísticos sobre a AV e na elaboração dos mapas das próprias redes.

No entanto é possível deliberar quatro tipos de configuração de um sistema de AV.

O primeiro tipo (Figura 9) corresponde ao sistema de AV mais comum, em que o sistema é composto por uma rede de linhas de AV que são utilizadas apenas por comboios de AV. Neste tipo de serviço, os comboios de AV não utilizam nenhuma linha que não seja dedicada a esse serviço, limitando-se às linhas de AV. O japonês Shinkansen segue esta metodologia (UIC, 2008).

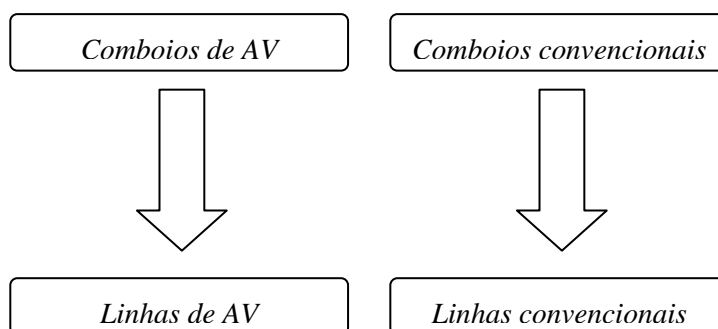


Figura 9 – Esquemática do 1º tipo de metodologia de operação de uma rede de caminhos-de-ferro

A segunda configuração (Figura 10) consiste numa rede de AV utilizada exclusivamente por comboios de AV, sendo também permitido, a circulação deste tipo de comboio, em redes convencionais. Em França, o TGV usufrui das linhas convencionais para servir grandes parcelas de território (UIC, 2008).

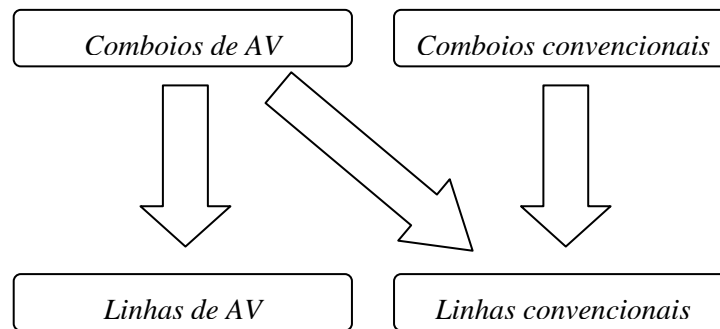


Figura 10 – Esquematização do 2º tipo de metodologia de operação de uma rede de caminhos-de-ferro

A terceira configuração (Figura 11), característica do sistema espanhol (AVE), consiste numa rede de AV que não é somente utilizada por comboios AV (> 250 km/h) mas também por outros comboios convencionais, que dispõem de dispositivos de mudança de via e que circulam a velocidades menos elevadas. Isto conduz inevitavelmente a uma redução da capacidade. Os comboios de AV, por sua vez, não utilizam as linhas convencionais (UIC, 2008).

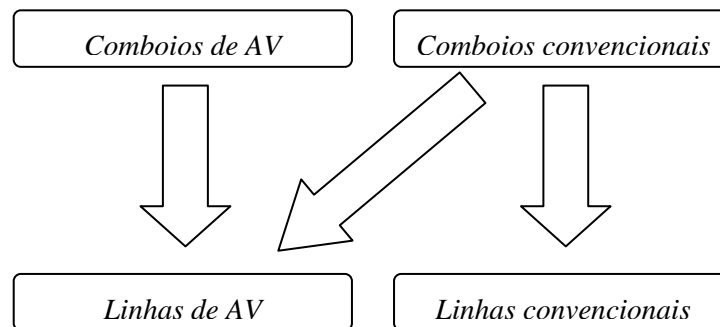


Figura 11 – Esquematização do 3º tipo de metodologia de operação de uma rede de caminhos-de-ferro

Por fim, a quarta configuração (Figura 12) é um modelo representativo do sistema alemão e do italiano, onde é autorizada a circulação de todas as categorias de comboios nas linhas de AV, assim como também é permitido a circulação de comboios de AV em todas as categorias de linhas.

Isto implica que o transporte de AV seja limitado do ponto de vista das infra-estruturas, aplicando em certos casos limites, como por exemplo, uma velocidade mínima de 160 km/h ou prevendo um número de circulações por dia de longo curso (UIC, 2008).

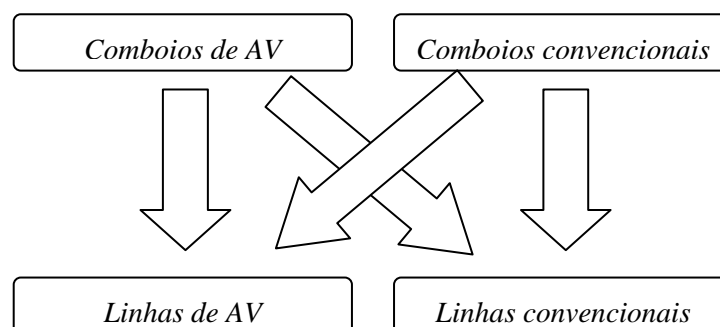


Figura 12 – Esquematização do 4º tipo de metodologia de operação de uma rede de caminhos-de-ferro

A transição entre uma linha de AV e uma linha convencional é muito ténue, sendo por vezes difícil determinar categoricamente se algumas linhas são ou não de AV.

Uma via desta natureza, que atravessa uma região com uma densidade populacional elevada, obriga forçosamente a uma limitação da velocidade da ordem de 110 km/h, de modo a minimizar os impactes sonoros. Ou ainda no caso de túneis e pontes de grande comprimento a velocidade também deve ser limitada na ordem dos 160 a 180 km/h, ou até menos, de modo a não comprometer a capacidade resistente das estruturas e consequentemente pôr em risco a segurança das pessoas (UIC, 2008).

Em muitos países, característicos por oferecer serviços ferroviários pouco rentáveis, a circulação de comboios com capacidade de transitar a 160 km/h oferecendo um nível de qualidade significativo e por vezes suportado por um verdadeiro mecanismo logístico de AV, pode fazer com que este serviço seja agrupado no cenário da AV (UIC, 2008).

2.3.3 BENEFÍCIOS DA ALTA VELOCIDADE

As principais vantagens dos sistemas de alta velocidade prendem-se com a sua elevada capacidade, o seu alto nível de segurança e por ser amigo do ambiente (UIC, 2008).

Um sistema ferroviário de AV é actualmente um mecanismo altamente sofisticado em todas as suas vertentes, actuando ao nível de vários sectores, tais como as infra-estruturas, localização das estações, características do material circulante, regras de funcionamento, sinalização, marketing, processos de manutenção, financiamento, gestão, aspectos legais, etc. (UIC, 2008).

Os aspectos que mais propicia a utilização da AV por parte dos passageiros estão relacionados com a velocidade e tempo de percurso.

A evolução da velocidade máxima em vias-férreas durante os últimos 50 anos, de 331 para 574,80 km/h em fase de ensaios e de 160 para 320 km/h em operação, permite concluir que existe uma margem significativa de capacidade de velocidade. Essa margem deverá existir sempre, de modo a transmitir aos passageiros a ideia de que, actualmente circulam à velocidade de 300 km/h, mas que a própria tecnologia possibilita circular muito mais rápido (Barrón, 2008).

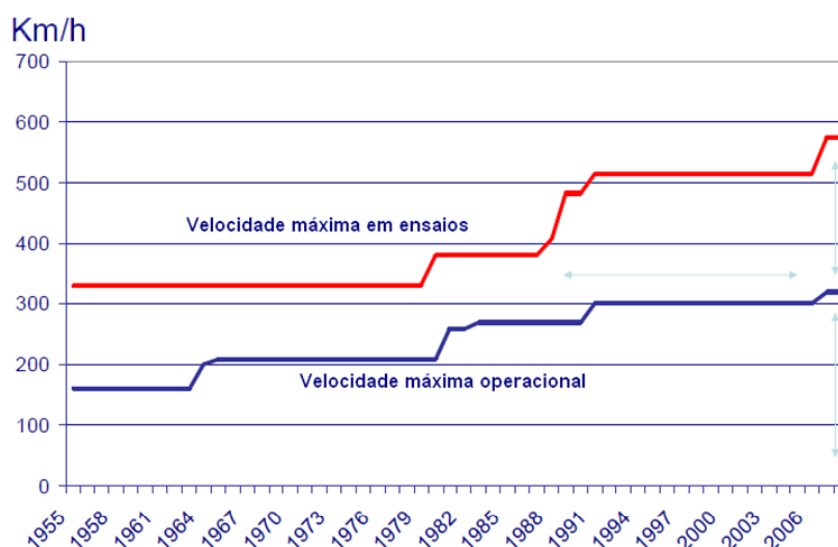


Figura 13 – Evolução da velocidade máxima em Vias-Férreas

(Adaptado de Barrón, 2008).

A velocidade permite deslocações rápidas num curto espaço de tempo. Este factor associado à simplicidade da utilização deste meio de transporte gera uma redução substancial da duração das viagens entre o ponto de origem e o destino final.

A Figura 14 apresenta a evolução da distância temporal na rede transeuropeia.

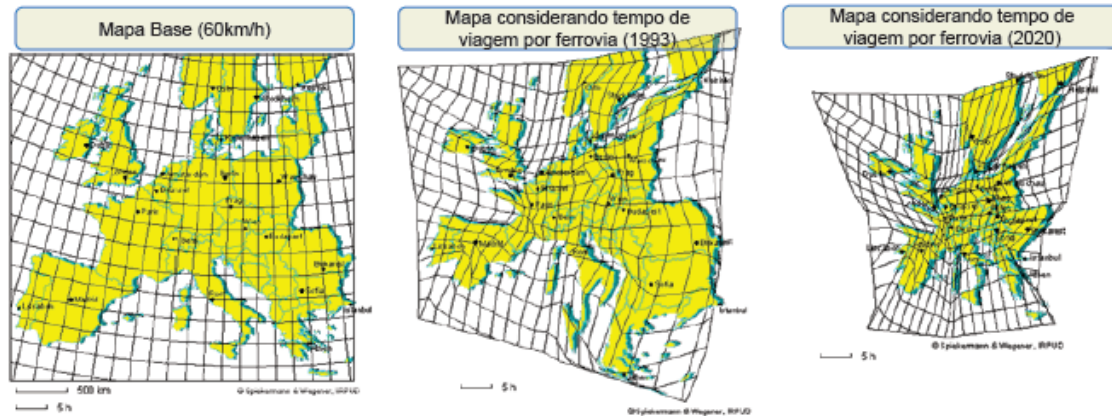


Figura 14 – Evolução da distância temporal na rede europeia de AV

(Fonte: “Accessibility and Economic Development in Europe”; Vickerman & Spiekermann & Wegener, 1997)

Além dos diferentes tipos de velocidades (velocidade máxima de teste, velocidade de circulação, velocidade média, velocidade comercial, etc.), é importante ter em conta os serviços oferecidos a bordo assim como também em todo o percurso (porta a porta). Por essa razão, afigura-se adequado denominar-se este tipo de transporte por “comboio de alto desempenho”.

Outro aspecto positivo é a frequência, que devido à elevada disponibilidade, contribui para o encurtamento do tempo total de viagem (em geral, é incluído metade da frequência no tempo total de viagem). A fiabilidade é importante, garantindo que o sistema de transportes funciona em praticamente todas as condições meteorológicas.

Relativamente à acessibilidade, não existe nenhum entrave, sendo possível apanhar o comboio com tranquilidade, evitando os elevados tempos de espera relativos aos padrões de formalidades, como é o caso dos registos de Check-In, oferecendo desta forma uma maior flexibilidade ao viajante (UIC, 2008).

Este meio de transporte oferece um elevado grau de conforto (espaço, aceleração, ruído, luminosidade, etc.) comparativamente ao avião, autocarro ou mesmo ao carro.

O espaço é um factor importante porque condiciona a liberdade de movimento, que no caso dos comboios é vantajoso uma vez que possibilita a movimentação dos passageiros em qualquer altura durante a viagem e não impondo também a obrigatoriedade do uso de cintos de segurança. Os comboios de AV representam sem dúvida um dos meios de transporte mais seguros (UIC, 2008).

A elevada capacidade de transporte, possibilita a movimentação até a um máximo de 300 000 passageiros por dia, reduzindo substancialmente o congestionamento rodoviário (UIC, 2008).

O enquadramento ambiental e paisagístico da estrutura viária origina um aproveitamento racional do espaço, equivalente em 1/3 de uma auto-estrada convencional. A eficiência energética deste meio de transporte é cerca de 9 vezes superior e 4 vezes superior a uma aeronave e a um automóvel, respectivamente (UIC, 2008).

O transporte ferroviário de alta velocidade contribui para estruturar o território e para controlar a expansão urbana promovendo consequentemente o desenvolvimento económico.

O crescimento das redes ferroviárias reverte enormes ganhos financeiros, sobretudo às grandes comunidades como é o caso da União Europeia, como também às entidades governamentais e empresariais.

A AV está constantemente associado a um serviço de qualidade. Esta imagem de marca é de tal ordem, que por vezes basta um comboio dispor de um elevado grau de conforto, de frequência e de acessibilidade para ser identificado como de AV, nem que porventura circule a uma velocidade não muito elevada (UIC, 2008).

É cada vez mais corrente a substituição dos transportes aéreos pelos ferroviários, até mesmo em deslocações entre aeroportos, adoptando as mesmas políticas de qualidade e segurança (tripulação, número de voo, cartão de embarque, etc.) (UIC, 2008).

Uma outra faceta importante da AV tem a ver com o transporte de mercadorias que apesar de actualmente apresentar uma evolução quase virtual, à excepção dos comboios-correios, é sem dúvida um sector que irá estar sujeito a um desenvolvimento acentuado nos tempos que se seguem. Apesar de nalgumas redes ser permitido a circulação de comboios de mercadorias em linhas AV, estes estão sujeitos a severas restrições podendo transitar unicamente em horário nocturno (UIC, 2008).

3

PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA VIA-COMBOIO

3.1 PROBLEMAS DINÂMICOS ASSOCIADOS À AV

A construção de vias ferroviárias de AV a que se tem assistido nos últimos anos tem levantado diversas questões relativas ao comportamento dinâmico da via. Em termos gerais, e partindo de um princípio de sub-estruturação, o comportamento dinâmico é ditado pela interacção de três subestruturas: o veículo, a via-férrea e o maciço de fundação. Esses problemas dinâmicos são mais susceptíveis quando o traçado impõe o atravessamento de zonas aluvionares constituídas por solos moles, onde em casos extremos, as velocidades de propagação das ondas S podem decrescer substancialmente (Alves Costa, 2008).

Para poder avaliar correctamente esse comportamento, é necessário analisar adequadamente as ondas emitidas. Essa verificação baseia-se em levantamento de dados ao nível da fonte emissora, do meio vibratório e por fim dos elementos receptores, como se pode ver na Figura 15.

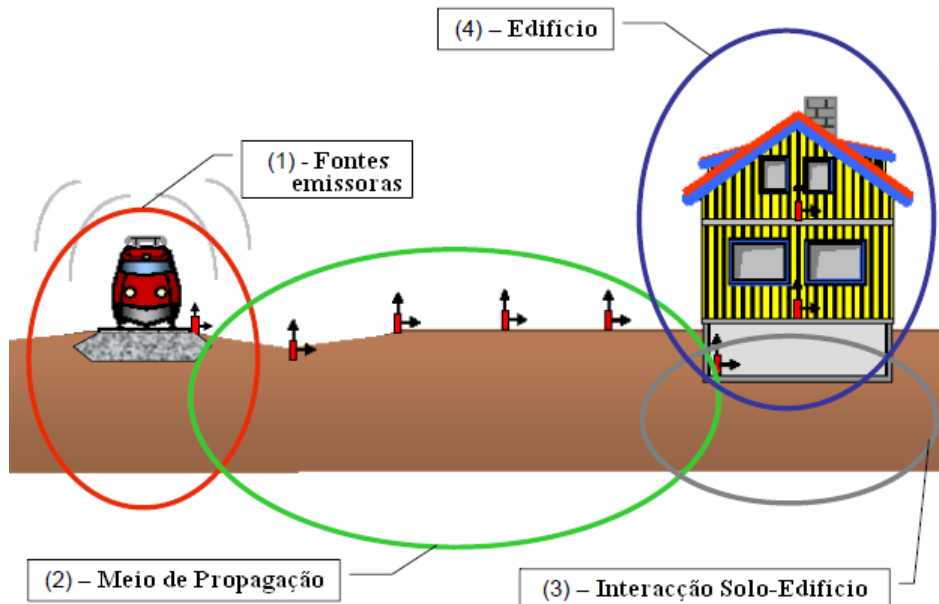


Figura 15 – Esquema de monitorização de vibrações emitidas à passagem de comboios de AV

(Adaptado de Madshus, 2007).

Estes três factores não actuam de forma independente, ou seja, existe uma interacção entre a fonte, o meio e os receptores. A interacção entre a via e o solo e entre o solo e os edifícios, exerce um papel importante (Holm et al., 2002).

As fontes emissoras são o comboio, a via, as palmilhas, as travessas e os restantes elementos da estrutura ferroviária. O meio de propagação das vibrações é o solo que normalmente é composto por estratos não homogéneos. Quanto aos receptores, estes podem ser, por exemplo, os edifícios, seres humanos e equipamentos mas também podem ser a via, as catenárias e/ou qualquer outra componente da estrutura ferroviária.

As vibrações na vizinhança causam distúrbios às pessoas, que estão no exterior dos edifícios, como às que estão no interior. Estas vibrações podem causar várias patologias nos edifícios, tais como, fendilhação das paredes ou até mesmo assentamentos permanentes das estruturas. As medidas para combater esses problemas implicam na maior parte das vezes, a adopção de trabalhos extensos de engenharia, recorrendo a equipamentos sensíveis, que provocam elevados custos para as operadoras.

As vibrações também têm um efeito prejudicial sobre os equipamentos ferroviários, causando um maior desgaste dos elementos, o que proporciona um aumento dos custos de manutenção. Os deslocamentos excessivos das vias impedem a circulação de comboios a elevadas velocidades, para as quais estariam inicialmente previstos, causando algum transtorno, como por exemplo, atrasos e custos extraordinários imputados aos operadores dos serviços.

3.1.1 VIBRAÇÕES AO LONGO DA VIA

As vibrações geram-se através dos comboios, que por intermédio dos seus bogies causam excitações na via, que por sua vez as transmite para o solo e meios físicos receptores. Um dos parâmetros mais importantes na determinação das propriedades das ondas emitidas, é a configuração dos eixos de carga dos comboios, i.e. a localização, a carga exercida, o amortecimento e o próprio sistema de suspensão do comboio. A aceleração e velocidade do comboio são também factores importantes.

A aceleração pode ser positiva, negativa (movimento retardado) se for suscitada por travagem ou centrífuga, se o comboio efectuar uma curva. Existem investigações que indicam que as travagens dos comboios produzem maiores vibrações nos terrenos (Holm et al., 2002).

As rodas dos comboios apresentam irregularidades geométricas que influenciam o movimento do comboio, agravando-se em caso de travagens forçadas. Sempre que existe movimento por parte das rodas, gerem-se forças periódicas que produzirão uma excitação nos carris com frequência igual à acção do rodado (Holm et al., 2002).

Quanto ao factor da velocidade, o seu aumento agrava a interacção da estrutura ferroviária com o solo adjacente produzindo um incremento considerável dos deslocamentos na via. É possível observar deformações contrárias ao sentido do carregamento, antes e depois dos rodados (Figura 3). Se os comboios circularem a uma velocidade denominada por velocidade crítica, obtém-se assentamentos e empolamentos máximos na via. Para velocidades acima da velocidade crítica, as amplitudes dos deslocamentos tendem a diminuir. Este fenómeno pode ser entendido como uma forma de ressonância onde a velocidade do comboio actua como frequência do movimento. Para velocidades de circulação supersónicas, os assentamentos verticais máximos podem apresentar desvios de fase relativamente aos eixos de carregamentos, tal como é possível constatar pela Figura 16. Isto significa que as rodas estão a sofrer um movimento ascendente criando uma força horizontal resistente ao movimento (Holm et al., 2002).

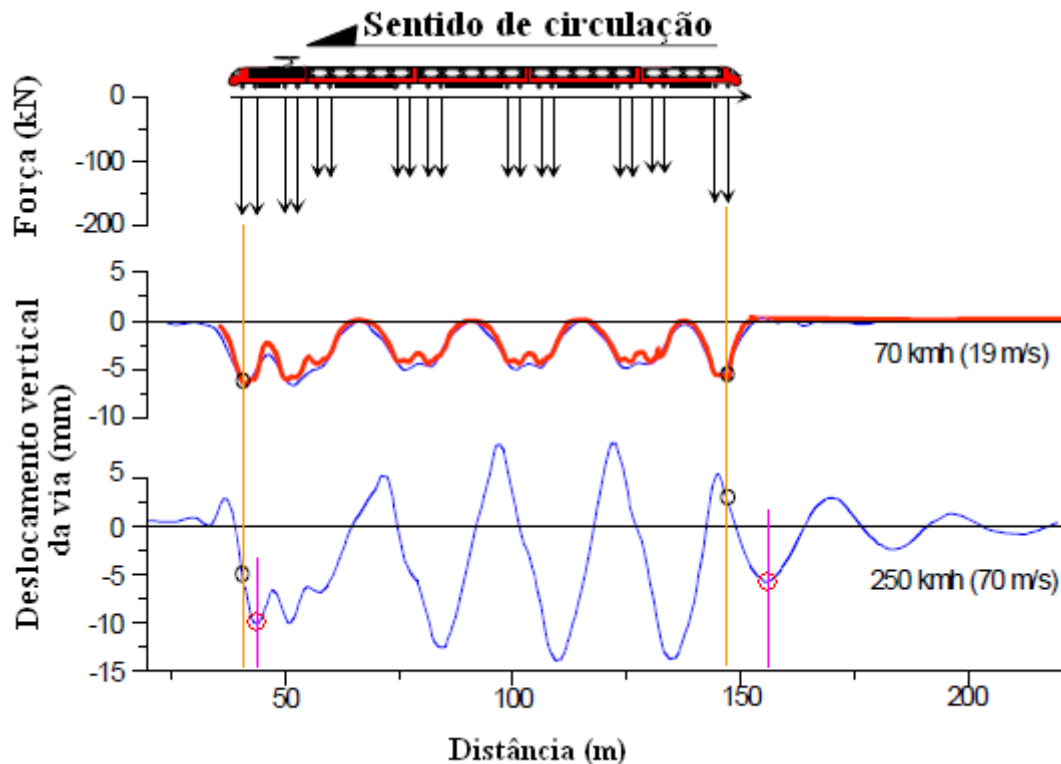


Figura 16 – Desvio de fase dos assentamentos verticais relativamente aos eixos de carregamento

(Adaptado de “Madshus et al.”, 2004)

A heterogeneidade da via é outro dos aspectos que está na origem de ondas de propagação, pois é responsável pela criação de forças de interação no sistema ferroviário, que são dispersas no terreno envolvente. Essa propagação de ondas é perceptível tanto para o observador que se encontra na proximidade da via como para um passageiro que viaja no comboio (Holm et al., 2002). Existem essencialmente dois tipos de heterogeneidades na via, que são, a irregularidade da geometria e a não homogeneidade da rigidez.

As principais irregularidades geométricas são as ondulações dos carris. Essas ondulações podem ser de várias dimensões, com comprimentos de onda que variam desde alguns milímetros a várias dezenas de metros. Quando um comboio transita sobre essas ondulações, as ondas transmitidas podem ter durações de propagação muito diferentes, com um largo intervalo de frequências. Quando um comboio circula numa curva, a força centrífuga gera forças horizontais nos carris, que por sua vez vão produzir movimentos horizontais na via e no solo. As mudanças de vias são outro tipo de heterogeneidade que é susceptível de causar vibrações excessivas no terreno à passagem de comboios.

No que refere à não homogeneidade da rigidez, os elementos que mais a condicionam são as travessas pois as rodas têm tendência a produzir uma variação de força ao longo do tempo, quando ocorre uma transição da parte do carril que se encontra suportada por uma travessa para uma secção que não tem qualquer apoio. Se a velocidade do comboio for constante, a componente vertical da força passa a ser periódica, com uma frequência denominada por frequência de passagem de travessa.

Outro factor que implica que sejam estabelecidas novas exigências quando se calcula a resposta da estrutura ferroviária à passagem de comboios é o amortecimento interno do balastro que tende a ser elevado. Este material apresenta propriedades não bem conhecidas, quando submetidos a cargas

dinâmicas. É previsível que as deformações por corte destes materiais sejam superiores, quando ocorrer a passagem de comboios, o que significa que o comportamento tensão deformação não é linear, diminuindo deste modo módulo de distorção à medida que a deformação aumenta.

Os fenómenos de propagação de ondas são provocados ainda pelas dimensões da estrutura ferroviária que se alteram frequentemente. As dimensões de uma estrutura ferroviária são em geral da ordem dos comprimentos de onda propagados. Isto indica que alguns comprimentos de onda (frequências) são emitidos com maior facilidade que outros. É deste modo previsível que a estrutura ferroviária seja capaz de filtrar grande parte das frequências das ondas emitidas. Se as dimensões dos comboios forem da ordem das ondas propagadas, então provavelmente existirão efeitos direccionais nas propagações das ondas, i.e. as ondas são emitidas com maior intensidade numa direcção do que outras, mas são ambas encaminhadas, tanto horizontalmente como verticalmente, para o interior do solo (Holm et al., 2002).

As elevadas velocidades de circulação podem proporcionar uma rápida diminuição do módulo de deformabilidade da sub-base, produzindo consequentemente vibrações no terreno. Este problema pode ocorrer para duas situações; quando um comboio, entra e sai de uma ponte (zonas de transição) ou quando atravessa uma zona de solo tratado, submetendo-o ao carregamento, por parte de uma força transiente, que irá produzir vibrações no terreno (Holm et al., 2002). Se o material se encontrar submetido várias vezes a um estado de tensão considerável, este poderá ter tendência a degradar-se, ou seja, os ciclos de carga-descarga a que o material estará sujeito, vão tender a reduzir o seu módulo de deformabilidade. Isto pode originar problemas de estabilidade no subsolo e na própria estrutura ferroviária (Holm et al., 2002).

3.1.2 VIBRAÇÕES NA VIZINHANÇA DA VIA

A passagem de um comboio produz assentamentos elásticos estáticos na via e no solo. Esse tipo de assentamento, também denominado por “depressão”, acompanha o movimento do comboio ao longo da via. Com o aumento da velocidade do comboio, ocorre um alargamento dessa depressão, na direcção perpendicular à via, diminuindo o amortecimento geométrico nessa mesma direcção. Por outro lado, existe uma redução dessa depressão na direcção da via. A amplitude do deslocamento é superior abaixo do comboio. No entanto, na direcção da via, o deslocamento diminui. Quando a velocidade do comboio iguala a velocidade das ondas de Rayleigh, a depressão fica teoricamente bastante profunda, diminuindo, no entanto consideravelmente, na direcção perpendicular a via. Nessa direcção ocorre um amortecimento geométrico menor (Holm et al., 2002). Na Figura 17 exemplifica-se esta situação.

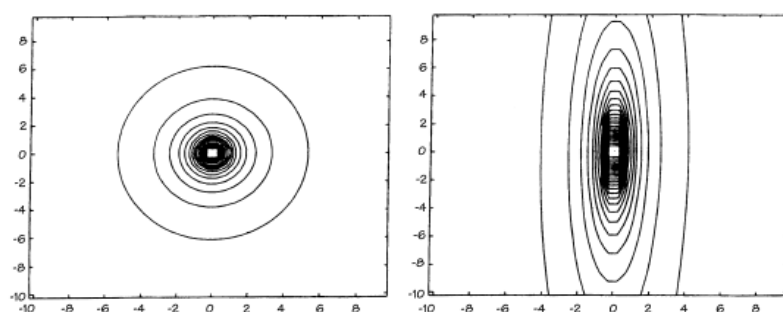


Figura 17 – Isolinhas dos deslocamentos na vizinhança da via, sendo o movimento das forças orientado no sentido da esquerda para a direita com velocidade igual a: a) 25 % da velocidade das ondas de Rayleigh; b) 98 % da velocidade das ondas de Rayleigh (Holm et al., 2002)

Uma das propriedades, que desempenha um papel importante nas vibrações induzidas no solo pelo comboio, é a velocidade das diferentes ondas que se propagam no solo, tais como, as ondas P, ondas S e as ondas de R (Figura 18).

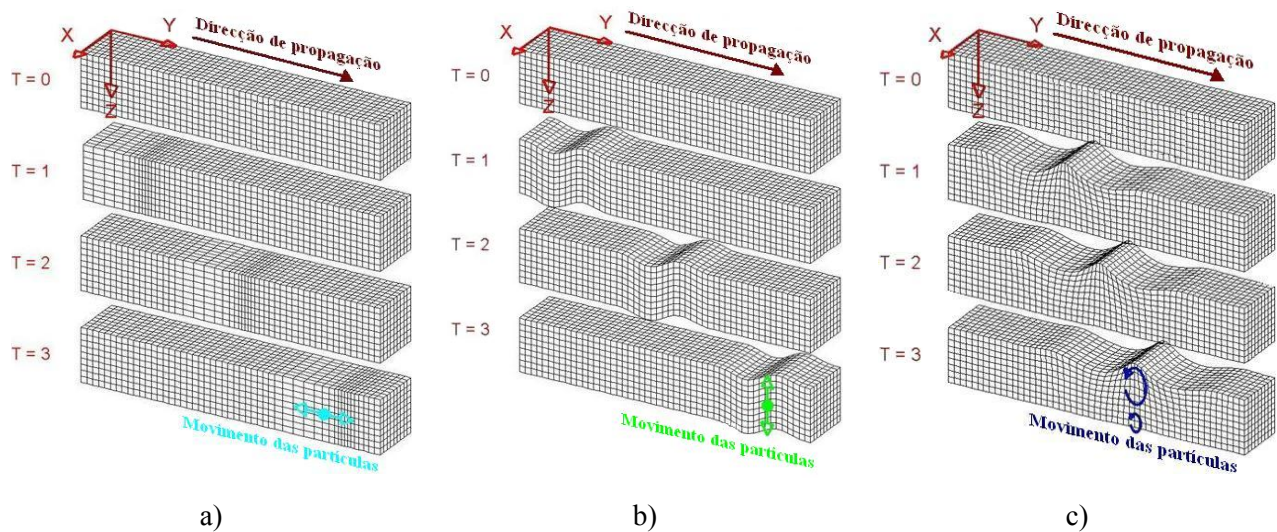


Figura 18 – Ondas de propagação: a) Ondas P (Primárias); b) Ondas S (Secundárias); c) Ondas R (Rayleigh)

(Adaptado de Braille, 2000)

Se a velocidade de circulação do comboio exceder uma destas três velocidades, a forma de propagação das ondas sofre drásticas alterações. Caso a velocidade seja inferior à velocidade das ondas de Rayleigh do solo, diz-se que a velocidade é sub-sísmica. Se a velocidade for superior à velocidade das ondas de Rayleigh e inferior às ondas P, diz-se que a velocidade é trans-sísmica. A onda de choque produzida pelas ondas de Rayleigh equipara-se a um avião, que voa a uma velocidade superior à do som. Caso a velocidade seja superior à velocidade das ondas P, diz-se que a velocidade é super-sísmica. Tanto as ondas de Rayleigh como as ondas P vão produzir ondas de choque. Estes impactos dão origem a elevados níveis de vibrações no solo. Usualmente, as ondas são atenuadas recorrendo à lei do inverso da distância. No entanto, a ressonância e os efeitos focais podem originar outro tipo de relações de atenuações (Holm et al., 2002). Apresenta-se na Figura 19 um esquema da produção das ondas de choque. Para tal, admite-se que um comboio se desloca em linha recta com uma determinada velocidade super sísmica V , isto é, com $V > V_R$, onde V_R representa o módulo da velocidade das ondas de Rayleigh. No instante t , o comboio encontra-se no ponto C. Ao passar pelo ponto A no instante t_1 , o comboio gerou uma onda esférica que se propaga à velocidade das ondas do meio de propagação. Essa onda esférica, no instante t , tem um raio R_A . Ao passar pelo ponto B no instante t_2 , o comboio produziu uma onda esférica que também vem se propagando à velocidade do meio. Essa outra onda esférica, no instante t , tem um raio R_B . Na verdade, ao passar por qualquer ponto o comboio produz ondas esféricas e no instante t considerado, a superfície envolvente dessas ondas é uma superfície cónica, chamada cone de Mach, com eixo na trajectória do comboio e vértice no ponto C, onde ele se encontra no instante t . Assim, quanto maior for a velocidade de circulação do comboio, menor será o ângulo de abertura do cone de Mach.

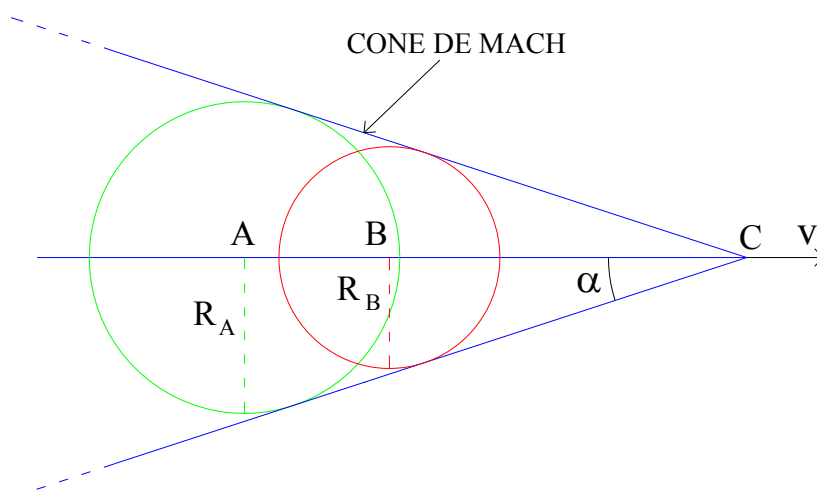


Figura 19 – Esquemática da evolução do cone de Mach

O amortecimento interno (dissipação) do meio desempenha um papel importante na propagação de ondas. Se as tensões aumentarem, o amortecimento também aumenta. Para um mesmo nível de tensão de corte, o amortecimento é maior em materiais sem coesão (areia, silte) do que em materiais coesivos (Holm et al., 2002).

3.1.3 VIBRAÇÕES NAS CATENÁRIAS E OUTROS ELEMENTOS DA ESTRUTURA FERROVIÁRIA

As vibrações e os movimentos dinâmicos das ferrovias podem ser transmitidos para as catenárias. As fontes dinâmicas, que interferem com estes elementos, são as movimentações dos comboios. Sendo os comboios, as principais fontes dinâmicas, é importante assegurar uma adequada ligação entre o pantógrafo e os cabos constituintes das catenárias, tanto para o caso dos comboios de AV como para os convencionais.

Existem velocidades críticas que dependem de diversos factores, como por exemplo, a rigidez e o suporte das catenárias, rigidez dos cabos, tensões nos cabos, propriedades do pantógrafo, etc. O comportamento dinâmico dos cabos e da interface com o colector do pantógrafo é condicionado pelo próprio pantógrafo e pelas imperfeições geométricas dos cabos e da via. Todo este processo é condicionado pelas propriedades dos vários dispositivos. Uma combinação desfavorável destes parâmetros associada a uma determinada velocidade de circulação pode resultar numa perda de estabilidade ao longo do movimento. Esta situação pode produzir fenómenos de ressonância, causando desgaste excessivo dos cabos, pondo em risco o seu correcto funcionamento, e provocar uma redução da eficiência do sistema eléctrico. A oscilação da força de contacto pode provocar, perdas de ligação entre os cabos e o colector, durante curtos períodos de tempo, causando sucessivos impactes mecânicos. Este fenómeno deve ser evitado ao máximo, caso contrário, o sucessivo desgaste mecânico pode provocar uma redução da capacidade de comunicação da via (Holm et al., 2002).

3.2 MÉTODOS DOS INTEGRAIS TRANSFORMADOS NA MODELAÇÃO DE MACIÇOS ESTRATIFICADOS HORIZONTALMENTE

Existem actualmente, algumas metodologias propostas, para poder prever o comportamento dinâmico do sistema ferroviário, à passagem de comboios, tendo em conta, diferentes graus de aproximação e envolvendo diferentes complexidades e tempos de computação.

De uma forma simplificada, pode-se agrupar os modelos das vias em três grupos distintos, que são, os métodos analíticos, os métodos numéricos e os métodos semi-analíticos.

A primeira metodologia abrange todos os modelos em que seja possível obter uma solução fechada. Este tipo de modelos, apesar de bastante limitado devido à sua simplicidade, é bastante útil em estudos preliminares e/ou até em alguns casos em que permite simular a complexidade do sistema (Alves Costa, 2008).

Dentro dos métodos numéricos enquadram-se os modelos baseados nos métodos dos elementos finitos (MEF ou FEM – Finite Element Method) ou nos métodos dos elementos de fronteira (BEM – Boundary Element Method). Nestes casos, o domínio de análise é discretizado em elementos finitos ou em elementos de fronteira no caso dos contornos, e o sistema de equações é resolvido através de integração numéricas sucessivas. A partir deste ponto, é possível obter a solução do problema, através de integrações numéricas faseadas no tempo com diferentes incrementos de espaço temporal. A simplicidade das formulações numéricas através destes modelos permite a resolução de problemas complexos relacionados com geometrias complexas, não linearidade dos materiais, etc. Contudo estes mecanismos podem apresentar algumas dificuldades, como por exemplo a definição do domínio e o tempo de computação. No primeiro caso, a complexidade que os modelos artificiais apresentam, requer a adopção de procedimentos especiais de forma a tomar em consideração a reflexão das ondas. As durações de cálculo podem variar desde poucos dias até várias semanas. As elevadas durações de computação limitam o domínio da análise, a regiões claramente mais pequenas, comparativamente à dimensão dos comboios (Alves Costa, 2008).

O Método dos Elementos Finitos é claramente o método mais utilizado no âmbito da Engenharia Geotécnica, dada a sua versatilidade na aplicação a geometrias complexas ou a materiais com comportamento constitutivo complexo. No entanto, o FEM foi desenvolvido para aplicação a meios circunscritos, com condições de fronteira totalmente definidas, situação adversa à simulação de maciços geotécnicos (Calçada, 2008).

O método dos elementos de fronteira é especialmente adequado na modelação de semi-espacos relativamente homogéneos e permite contabilizar de forma adequada o amortecimento por radiação nas fronteiras situadas a grande distância. Por outro lado, não é muito adequado à resolução de problemas com irregularidades, quer geométricas, quer mecânicas, como as que ocorrem, naturalmente, na maioria dos casos reais (Marcelino, 2007).

Os modelos semi-analíticos caracterizam-se pela utilização de equações analíticas. No entanto o resultado final que se obtém, não é uma solução fechada. Para se determinar a solução final, é necessário recorrer a outras ferramentas numéricas, como por exemplo, as transformadas inversas de Fourier. Dentro das diferentes metodologias enquadradas neste tipo de modelos, são os Métodos dos Integrais Transformados (MIT ou ITM - Transformed Integral Method) que mais interesse apresentam. No MIT, as componentes do sistema via-solo, não são discretizadas no espaço mas sim descritas através de funções diferenciais parciais. O tratamento analítico, das equações que compõem o sistema, é obtido recorrendo a transformações analíticas, nomeadamente transformadas de Fourier (Alves Costa, 2008).

Os integrais transformados não são somente utilizados no domínio tempo/frequência mas sim também nos domínios, espaço longitudinal/número de onda, no caso da via e do solo, e espaço transversal/número de onda para o solo em particular. Apenas a coordenada vertical é que é remetida para o domínio não transformado (Alves Costa, 2008).

Uma vez que as coordenadas verticais se encontram no domínio não transformado, é necessário recorrer a uma formulação em MEF para discretizar o domínio.

Geralmente, os modelos baseados nos MIT são adequados para estudar estruturas infinitas, reduzindo consideravelmente o tempo de cálculo, comparativamente aos modelos numéricos (Alves Costa, 2008).

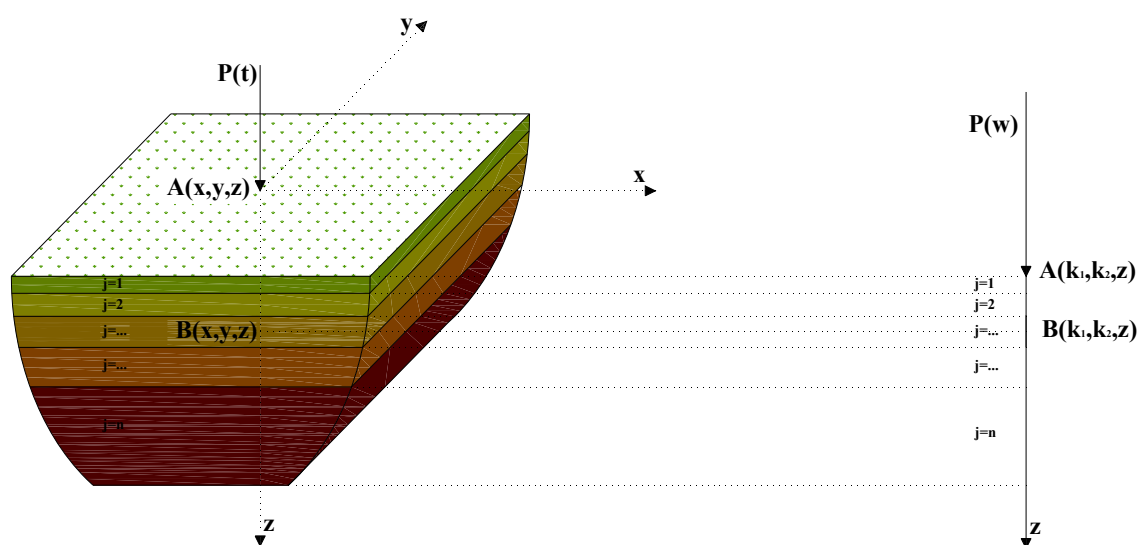


Figura 20 – Maciço estratificado sujeito a carregamento dinâmico: a) Problema real; b) Problema no domínio transformado com a respectiva malha de elementos finitos

É cada vez mais frequente a utilização destas metodologias, particularmente nas investigações realizadas na área das ferrovias, para estudar os problemas dinâmicos que possam ocorrer na via e na vizinhança.

Por outro lado, os modelos elaborados a partir destes métodos estão sujeitos a alguns requisitos e apresentam algumas limitações, como por exemplo, todas as componentes do sistema têm de ter comportamento linear, as camadas do solo têm de ser horizontais e infinitas no plano horizontal (Figura 20), o estabelecimento de determinadas condições iniciais é frequentemente impossível e ainda alguns casos especiais, como simular a circulação de comboios em troços curvilíneos são difíceis de incluir neste tipo de modelos (Alves Costa, 2008).

Quanto às condições de fronteira, estas devem ser definidas de modo a ser possível resolver o sistema de equações que define o equilíbrio e o movimento do sistema.

Se o maciço estiver assente numa fundação de elevada rigidez (Bedrock), o nó da malha discretizada verticalmente, que estabelece o contacto entre o maciço e a fundação, deve ser bloqueado de modo a ficar impedido de movimentos nas diferentes direcções.

Caso se considere que o maciço se encontra assente num semi-espaço indefinido (Halfspace), a condição de fronteira é submetida a um tratamento mais sofisticado, uma vez que as propriedades do

semi-espaco (rigidez, massa, amortecimento) influenciam a resposta do sistema. Além disso, uma condição de fronteira deste tipo, supõe que não existem ondas de chegada, ou seja, as ondas que advêm das estratificações superiores são enviadas para o infinito (Alves Costa, 2008).

3.3 MODELAÇÃO DA VIA-FÉRREA

Nos últimos anos, vários autores propuseram metodologias diferentes para modelar de forma mais aproximada a estrutura de uma via-férrea.

No presente trabalho, considerou-se que todos os elementos constituintes da via, nomeadamente, os carris, as travessas, as palmilhas, e o balastro fossem uma estrutura homogênea, de modo a unificar as propriedades da via. Para tal admitiu-se que todas as componentes da via seriam modeladas através de uma viga Bernoulli-Euler de comprimento infinito apoiada na superfície do solo, tal como se apresenta na Figura 21 (Alves Costa, 2008).

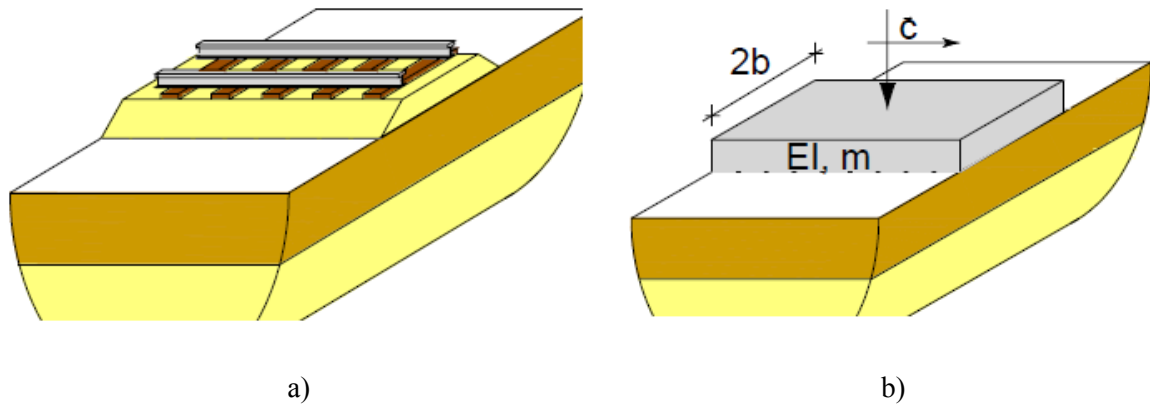


Figura 21 – Modelação da via-férrea: a) Estrutura real; b) Modelo da viga de Bernoulli-Euler (Alves Costa, 2008)

Apesar de não representar da melhor forma o problema real, não deixa de ser uma metodologia aceitável para simplificar o processo de modelação da via.

Uma outra solução para modelar a via, passaria por considerar separadamente as propriedades de todos os elementos da via.

A equação diferencial que estabelece o equilíbrio do sistema é dada pela seguinte expressão:

$$EI \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^4} + ku(x, t) + c\dot{u}(x, t) + m\ddot{u}(x, t) = P(x - ct)e^{i\Omega t} \quad (6)$$

Em que EI é a rigidez à flexão da viga, u é o deslocamento vertical, x é a distância ao longo da via, t é o tempo, k é impedância do solo, c é o coeficiente de amortecimento da via, m é a massa por unidade de comprimento da viga e P é a função de carga movimentando-se a uma velocidade c.

A solução pode se obtida no domínio do tempo/espaco ou até por intermédio das transformadas de Fourier. Uma vez que as funções de Green são desenvolvidas no domínio das transformadas de Fourier, a solução, também ela tem que ser obtida neste domínio (Alves Costa, 2008).

Caso se aplique as transformadas de Fourier em ordem ao tempo e ao espaço através da equação de equilíbrio, é possível obter o deslocamento transformado do solo por meio da seguinte expressão:

$$\tilde{u}(k_1, \bar{\omega}) = \frac{\tilde{P}(k_1, \bar{\omega})}{EI k_1^4 + i c \bar{\omega} - m \bar{\omega}^2 k_1^2 + k} = \tilde{H}_T(k_1, \bar{\omega}) \times \tilde{P}(k_1, \bar{\omega}) \quad (7)$$

Em que $\tilde{H}_T(k_1, \bar{\omega})$ representa a função transferência dos deslocamentos da via, sendo completamente independente da função do carregamento, $\tilde{P}(k_1, \bar{\omega})$ é a acção no domínio transformado; k_1 , é a imagem de Fourier na direcção longitudinal do movimento; $\bar{\omega}$ é a imagem de Fourier da variável temporal.

O conceito de função de transferência é largamente utilizado em análises no domínio da frequência. O papel desta função é apenas transformar os dados de entrada (input) para resultados finais (output).

No entanto, para se obter os deslocamentos no domínio do espaço/tempo, é necessário inverter os resultados obtidos pela expressão (7) aplicando para tal, transformadas inversas de Fourier.

Apesar da simplificação que este modelo emprega, existem muitos investigadores que o adoptam para simular o comportamento das vias e posteriormente comparar com dados experimentais, obtendo geralmente resultados satisfatórios (Alves Costa, 2008).

3.4 CARGAS MÓVEIS

3.4.1 DEFINIÇÃO DO MODELO DE CARREGAMENTO

A principal causa de geração de vibrações está associada com o movimento do campo de tensões resultante das cargas dos eixos dos comboios em movimento e com a resposta da superestrutura ferroviária e respectiva fundação a essas acções (Marcelino, 2007).

Apesar de neste trabalho as passagens dos comboios terem sido simuladas através de um modelo de carregamento de nós móveis, importa no entanto referir como é constituído estruturalmente um comboio. O comboio é constituído por um conjunto de veículos em que cada um compreende, por sua vez, um conjunto de massas ligadas entre si por suspensões. Para contabilizar de forma correcta a dinâmica do veículo, o modelo correspondente deve incluir as rodas, os bogies, a carruagem e os sistemas de suspensão que ligam entre si as diversas massas, como se pode ver pela Figura 22 (Marcelino, 2007).

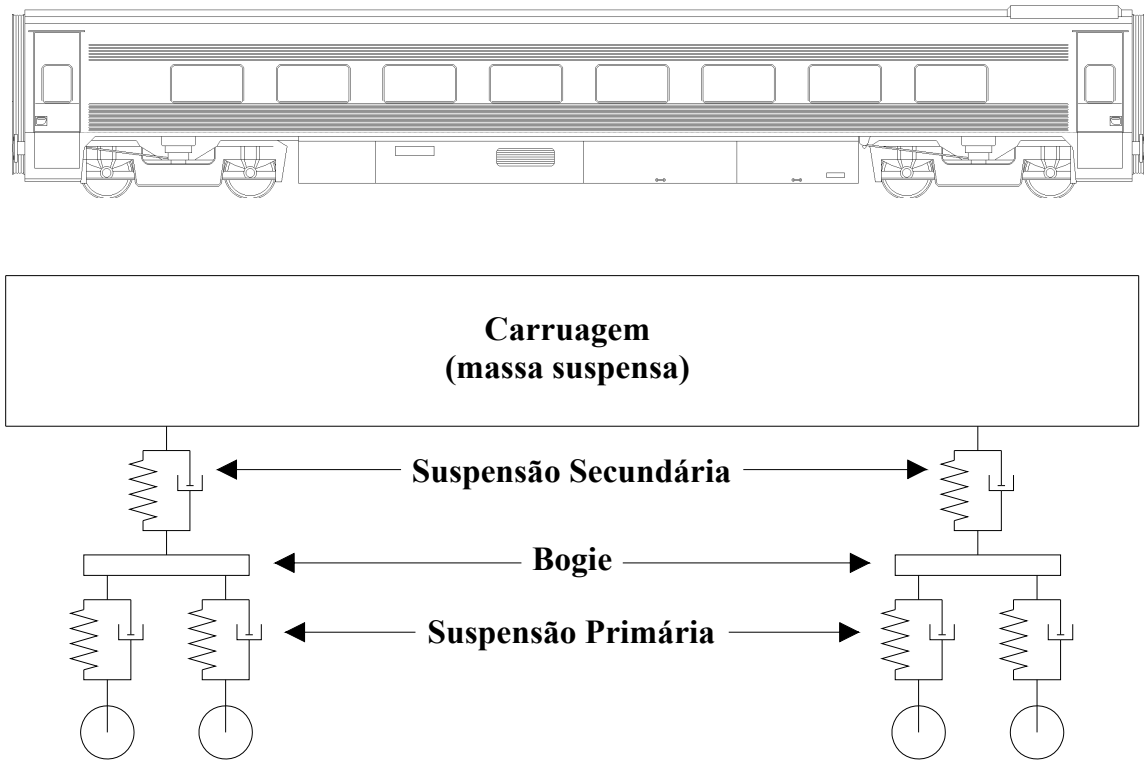


Figura 22 – Modelo analógico de uma carruagem com os respectivos rodados, bogies e suspensões

A função da acção no domínio transformado $\tilde{P}(k_1, \bar{\omega})$ pode apresentar diversos estágios de complexidade, consoante se considere ou não a interacção comboio-via. Calçada (2008) e Alves Costa (2008) adoptaram uma simulação simplificada onde o comboio não é estruturalmente simulado, sendo apenas considerada a acção das cargas móveis correspondentes à distribuição do peso pelos eixos. Deste modo, a função da acção depende da distribuição de cargas pelos eixos do comboio, sendo dada por:

$$\tilde{P}(k_1, \bar{\omega}) = 2\pi \tilde{P}(k_1) \delta(\bar{\omega} + k_1 c) \quad (8)$$

$$\tilde{P}(k_1) = \sum_{j=1}^n P_j e^{-ik_1 a_j} \quad (9)$$

em que: c é a velocidade de circulação do comboio, P_j é a força transmitida pelo eixo j à via; a_j é a posição espacial do eixo j quanto $t = 0s$.

A função de Dirac que surge na expressão (8) implica que a função de carga só tenha significado quando $\bar{\omega} = -k_1 c$, ou seja, obrigando a um corte na função de transferência ao longo da linha de velocidade. Deste modo, a menor ou maior amplificação depende da coincidência ou não dos “picos” da função de carga com os “picos” da função de transferência. Esta propriedade é de grande importância em termos de tempo computacional. Após determinada a função de transferência para um dado local e para uma dada velocidade, basta multiplicar essa mesma função pela função de carga do

comboio, permitindo uma economia considerável em termos computacionais. Por último, a resposta no domínio da frequência/nº de onda pode ser transformada para o domínio do espaço/tempo através da aplicação de transformadas inversas de Fourier (Calçada, 2008).

3.4.2 COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE ADOPTADOS NO CÁLCULO NUMÉRICO

Seguidamente são apresentados os modelos dos comboios adoptados nas simulações numéricas do capítulo 4.

Comboio X2000



Figura 23 – Comboio X2000 da SJ a passar em Gripenberg, Suécia

(Fonte: F.Iliovici – www.railpictures.net)

O comboio basculante X2000 é um comboio de transporte de passageiros com capacidade de atingir uma velocidade de 276 km/h. No entanto por questões de segurança, a sua velocidade comercial ronda os 200 km/h. Este comboio encontra-se em operação na Suécia sob exploração da SJ (Statens Järnvägar).

Cada unidade pode conter 16 carruagens intermédias, o que equivale a uma capacidade máxima de 1600 passageiros. No entanto a composição corrente deste comboio contém cerca de 5 carruagens.

No presente modelo de cálculo, o comboio utilizado é formado por uma composição de 4 carruagens, como se pode observar na Figura 24.



Figura 24 – Comboio X2000 adoptado nas simulações

Este comboio é constituído por 10 bogies, o que corresponde a 20 eixos de carga. As forças equivalentes variam consoante o tipo de carruagem. No bogie dianteiro da automotora, a carga por eixo é de 181,50 kN variando para 180 kN no bogie seguinte. Nas restantes carruagens, as cargas reduzem para 122,50 kN à excepção dos eixos que compõem o bogie da frente do comboio, em que as

forças são de 160 kN. É importante realçar que o facto da composição apresentar uma geometria assimétrica, o que altera o comportamento do modelo, daí ser necessário considerar, o sentido do movimento. No caso de obra estudado, admitiu-se que a deslocação é feita da esquerda para a direita.

A distância média entre eixos é aproximadamente 2,80 m. O afastamento entre os eixos extremos é de 107,10 m.

As distâncias entre os centros dos bogies variam consoante a tipologia da carruagem. Estas podem ser de 9,50 m, 14,50 m e 17,70 m no caso de se tratar da automotora, da carruagem da frente do comboio e das carruagens intermédias, respectivamente. O afastamento dos bogies entre carruagens é de 7,00 m. Na Figura 25 encontra-se ilustrado o modelo do carregamento referente ao comboio X2000.

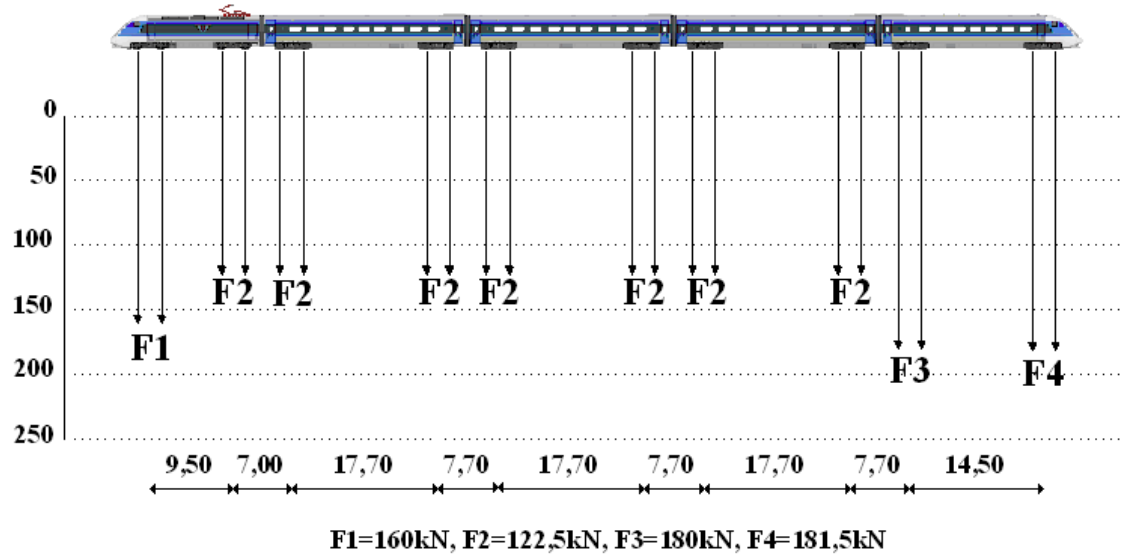


Figura 25 – Modelo do carregamento referente ao comboio X2000

Comboio ETR



Figura 26 – ETR 500 da FS a circular em Bolonha, Florença

(Fonte: G.Berto – www.railpictures.net)

Existem vários modelos de ETR, no entanto neste estudo é aplicado o modelo ETR 500. O primeiro protótipo, denominado por ETR 500-X e também conhecido por “Remo”, foi submetido a ensaios em 1988 na linha “Diretissima” onde atingiu uma velocidade máxima de 319 km/h.

Em 1990, entrou em fase de ensaios o modelo ETR 500-Y, também conhecido por “Romolo”. A fase de testes decorreu durante um período de cinco anos, entrando definitivamente em serviço em 1995. Durante os ensaios, o ETR 500-Y conseguiu alcançar, na linha Milão-Bolonha, uma velocidade de 350 km/h.

O modelo padrão é constituído por duas automotoras e onze carruagens intermédias, perfazendo um comprimento total de 327,60 m com capacidade para 656 passageiros (187 em 1ª classe e 469 em 2ª classe).

O exemplo que é adoptado neste trabalho é constituído por duas automotoras e dez carruagens, como se pode ver na Figura 27.



Figura 27 – Comboio ETR adoptado nas simulações

Este comboio apresenta na sua constituição 24 bogies o que representa 48 eixos de carga. A geometria desta composição é simétrica, o que proporciona um modelo de carregamento também ele simétrico. As cargas mais elevadas correspondem às das automotoras, com forças de 187 kN por eixo enquanto que para as carruagens intermédias, estes valores baixam para 120 kN por eixo (Figura 28).

Os eixos de carregamento de cada bogie encontram-se sempre afastados de 3,00 m. A distância entre os centros dos bogies da automotora é de 12,00 m enquanto que nas restantes carruagens é de 19,00 m. O afastamento entre os eixos de bogies de carruagens adjacentes é de 7,10 m à excepção da ligação entre a automotora e uma carruagem convencional, em que esse comprimento é de 7,40 m. O comprimento que separa os eixos extremos do comboio é de 295,70 m.

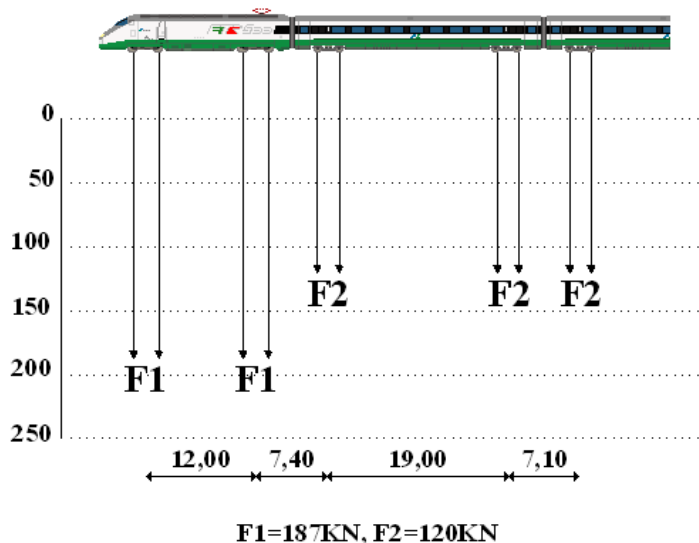


Figura 28 – Modelo do carregamento referente ao comboio ETR

Comboio Eurostar



Figura 29 – Eurostar em Landry, França

(Fonte: E.Raphael – www.pbase.com)

O Eurostar é um comboio que faz a ligação entre Londres (St Pancras) e Paris (Gare du Nord) onde atravessa o canal da Mancha passando pelo Eurotúnel. Além deste trajecto, também estabelece a ligação entre Lille e Bruxelas (Gare du Midi).

Este comboio é composto por 18 são carruagens e duas automotoras. A capacidade deste comboio é de 794 passageiros, sendo 594 em segunda classe e 210 em primeira classe.

Na Figura 30 encontra-se ilustrado o modelo Eurostar adoptado neste trabalho.



Figura 30 – Comboio Eurostar adoptado nas simulações

O Eurostar é um comboio articulado, em que as carruagens consecutivas têm em comum um único bogie. No entanto existem carruagens que além dessa configuração ainda detêm um bogie isoladamente, que é o caso das carruagens centrais e das adjacentes às automotoras. Este comboio é composto por 24 bogies o que significa que o modelo de carregamento envolve 48 eixos de carga. Todos os eixos descarregam uma força de 170 kN (Figura 31). Os centros dos bogies da automotora encontram-se 14,00 m afastados entre si, enquanto que nas carruagens esta distância é de 18,70 m. Existem duas excepções, que são a ligação da automotora à carruagem adjacente e a ligação das carruagens centrais, onde o afastamento entre bogies é de 6,275 m e 6,52 m, respectivamente. Os eixos pertencentes a um mesmo bogie encontram-se distanciados de 3,00 m. O afastamento entre os eixos extremos é de 386,67 m.

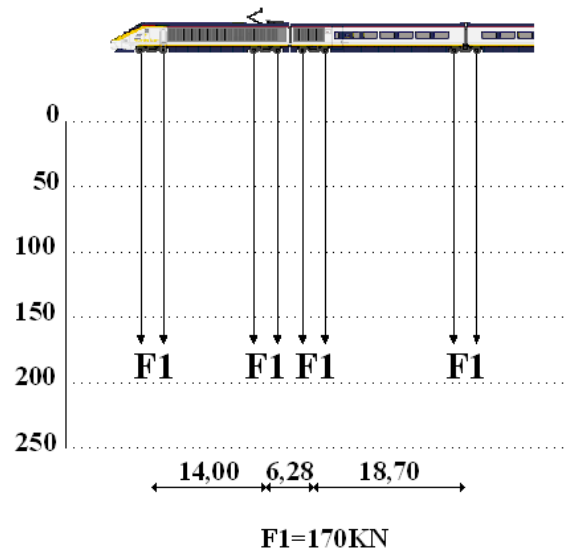


Figura 31 – Modelo do carregamento, referente ao comboio Eurostar

Comboio ICE 2



a)



b)

Figura 32 – ICE 2: a) ICE 2 em Bavaria, Alemanha; b) ICE 2 duplo da DB a passar por Alexanderplatz em Berlim

(Fonte: D. Kerston; A. Stroshane – www.railpictures.net)

Os comboios ICE da DB circulam essencialmente em território alemão. Existem vários modelos de ICE, como por exemplo ICE-1, ICE-2, ICE-3, ICE-V, etc. Neste trabalho é abordado o ICE-2, que é um comboio com capacidade de 54 e 75 passageiros por carruagem em 1ª e 2ª classe, respectivamente. O ICE-2 circula com frequência na linha Este-Oeste da Alemanha, partindo de Berlim com duas composições sendo efectuada a sua separação em Hamm. A velocidade máxima atingida por este comboio foi de 310 km/h em fase de ensaios e de 280 km/h em serviço. Neste estudo foi adoptado um ICE-2 duplo idêntico ao que aparece representado na Figura 33.

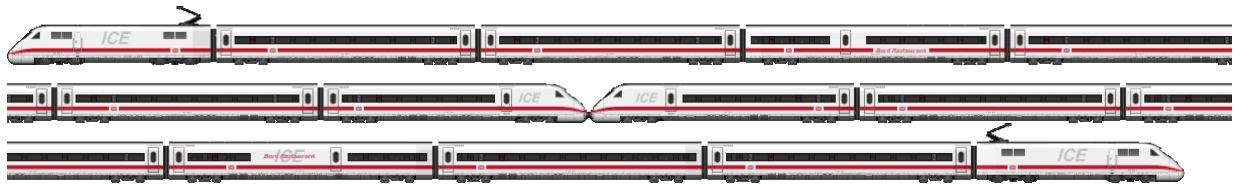


Figura 33 – Comboio ICE-2 adoptado nas simulações

O sistema de rolamento do ICE-2 é semelhante ao ETR, em que cada elemento da composição, possui dois bogies. Os eixos dos bogies das carruagens intermédias, exercem uma força de 112 kN, enquanto que dos eixos das automotoras transmitem uma carga de 195 kN (Figura 34).

No ICE-2, os bogies são mais estreitos nas carruagens que na automotora, sendo os afastamentos entre eixos do mesmo bogie de 2,50 e 3,00 m, respectivamente.

A distância entre os centros dos bogies da mesma carruagem é de 19,00 m, enquanto que na automotora é de 11,46 m. Os bogies entre carruagens encontram-se distanciados de 7,40 m, enquanto que a distância entre bogies na junção da automotora com a carruagem adjacente é de 7,60 m. A extensão entre os eixos extremos é de 350,52 m, uma vez que o modelo adoptado é um comboio duplo.

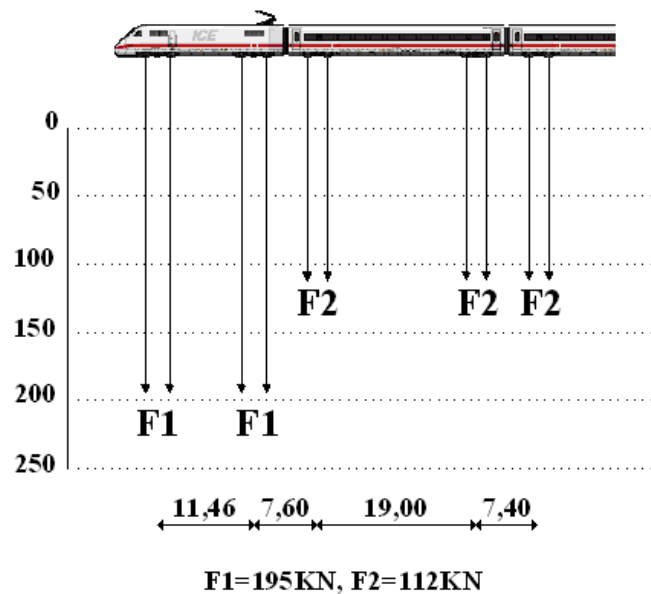


Figura 34 – Modelo do carregamento referente ao comboio ICE-2

Comboio Talgo



Figura 35 – Talgo 350 duplo da RENFE em Savinan na linha Madrid-Tarragona

(Fonte: F. Aranda – www.railpictures.net)

O Talgo 350, conhecido comercialmente em Espanha por AVE 102, e vulgarmente por “pato”, é um comboio genericamente constituído por duas automotoras e 12 carruagens intermédias, com capacidade para 318 passageiros. Em Espanha, este modelo foi inicialmente projectado para servir a ligação entre Madrid e Barcelona. Embora a velocidade máxima atingida em serviço comercial seja de 330 km/h, este comboio consegue alcançar velocidades superiores a 350 km/h.

Neste trabalho é adoptado um comboio com duas composições, onde cada uma delas é constituída por duas automotoras e 10 carruagens intermédias, como se pode observar na Figura 36.



Figura 36 – Comboio Talgo adoptado nas simulações

Este comboio apresenta um sistema de eixos bastante diferente relativamente a outros comboios. Apesar da automotora dispor de dois bogies de eixo duplo, as carruagens intermédias encontram-se unidas através de um bogie singular, constituído por um único eixo. As forças exercidas pelo comboio são iguais para todos os eixos, sendo a intensidade de cada uma delas igual a 170 kN (Figura 37). O afastamento entre bogies nas carruagens intermédias é de 13,40 m, enquanto que na automotora esse comprimento diminui para 11,00 m. O espaçamento dos eixos nos bogies duplos é de 2,65 m. A carruagem adjacente à automotora é um caso particular, uma vez que o bogie não partilha a ligação com a própria automotora e a distância à carruagem seguinte ser menor. Sendo assim, o comprimento que separa o bogie da carruagem adjacente à automotora da própria automotora e da carruagem consecutiva é de 6,80 m e 8,97m, respectivamente. O afastamento entre os eixos extremos, do modelo adoptado, é de 356,05 m.

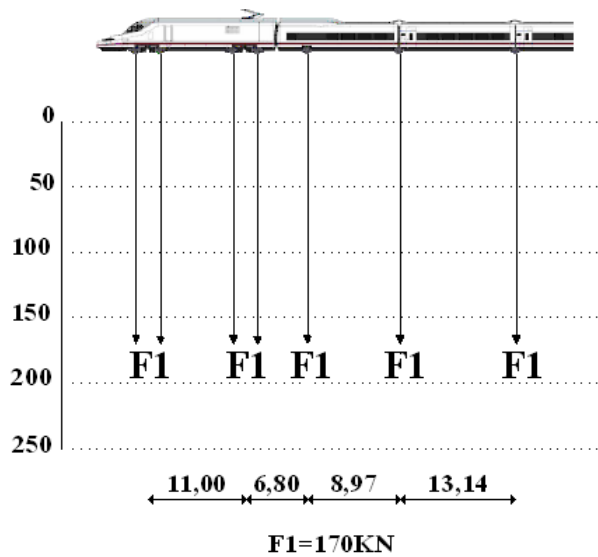


Figura 37 – Modelo do carregamento referente ao comboio Talgo

Comboio TGV



Figura 38 – TGV duplo da SNCF a circular na linha “Sud-Est” próximo de Grésy-sur-Isère

(Fonte: E.Raphael – www.pbase.com)

O TGV é o comboio mais emblemático e o mais famoso do mundo na área da AV. São evidentes e notórios os progressos que este comboio tem revelado ao longo do tempo. Deslumbra multidões em todo mundo com os recordes mundiais de velocidades que conseguiu alcançar. Presentemente, desde do dia 3 de Abril de 2007, é detentor do recorde mundial actual de 574,8 km/h que foi atingido na linha “Est”. No entanto a velocidade comercial deste comboio ronda os 300 km/h, variando consoante o tipo de equipamento. Dos vários modelos existentes, optou-se por adaptar neste trabalho o TGV Atlantique duplo, em que cada uma das composições é composta por 10 carruagens e duas automotoras. Cada uma das composições tem capacidade para 485 passageiros.

Na Figura 39 encontra-se ilustrado o comboio TGV adoptado neste trabalho.

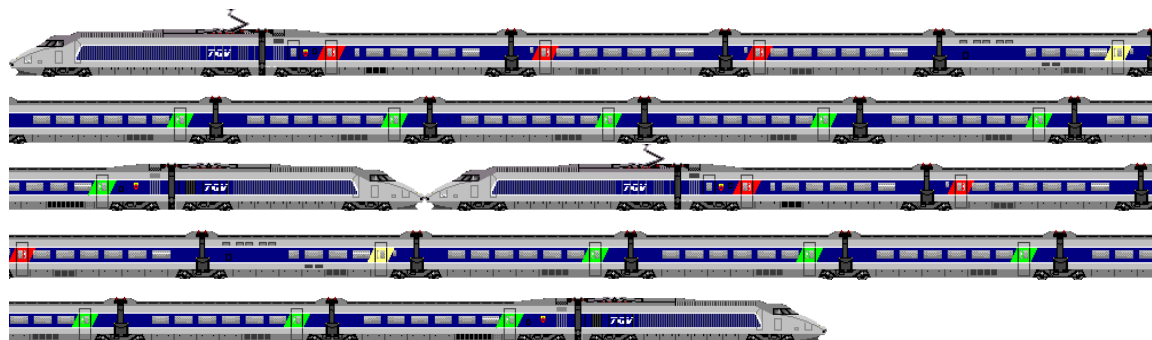


Figura 39 – Comboio TGV adoptado nas simulações

Este comboio é constituído por 30 bogies, o que corresponde a 60 eixos de carga. As forças transmitidas pelos eixos são de 170 kN à excepção dos bogies posteriores das automotoras onde o valor das cargas é de 163 kN por eixo (Figura 40).

Os centros dos bogies das carruagens intermédias e das automotoras, encontram-se distanciados entre si por 18,70 m e 14,00 m, respectivamente. Os bogies das carruagens adjacentes às automotoras encontram-se afastados dos bogies das próprias automotoras por 6,275 m. A distância entre eixos, pertencentes a um mesmo bogie, é sempre 3,00 m e o afastamento entre os eixos extremos é de 468,14 m.

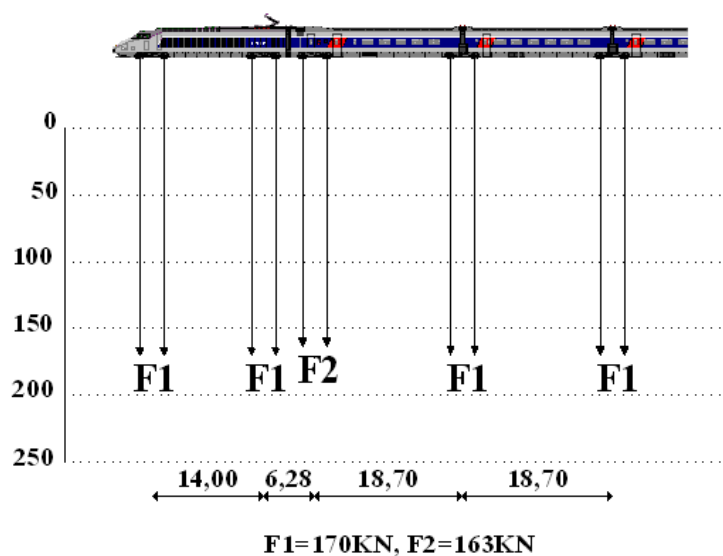


Figura 40 – Modelo do carregamento referente ao comboio TGV

Comboio Thalys



Figura 41 – Thalys PBA (Paris–Bruxelas–Amesterdão) duplo da SNCF em Vémars, Paris

(Fonte: F.Jolly – www.railpictures.net)

Existem actualmente em operação dois tipos de comboios Thalys, que é o PBA (tri-corrente) e o PBKA (quadri-corrente). Os modelos PBA e PBKA são comboios derivados do TGV Réseau e do TGV POS, respectivamente. O primeiro estabelece a ligação entre as cidades de Paris, Bruxelas e Amesterdão, enquanto que o PBKA une para além de estas cidades, a cidade de Colónia.

Estes comboios são geridos pela Thalys International, que é um grupo cooperativo constituído pelas entidades, SNCF (62 %), NMBS/SNCB (28%) e DB (10%).

Um Thalys, constituído por 10 carruagens intermédias, permite transportar 370 passageiros. Na Figura 42 é possível observar o modelo que foi adoptado no cálculo numérico. Este é constituído por um acoplamento de duas composições, ou seja, 4 automotoras e 20 carruagens intermédias.

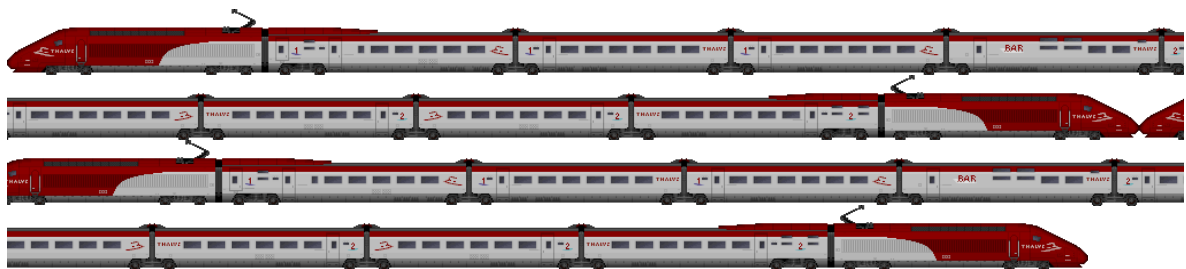


Figura 42 – Comboio Thalys adoptado nas simulações

A constituição deste modelo é idêntico ao do TGV referido anteriormente, visto ser ambos da mesma família de comboios. As únicas divergências entre este modelo e o TGV são o número de carruagens intermédias, que é menor no Thalys e consequentemente o afastamento entre os eixos extremos que passa de 468,14 m para 393,34 m. Na Figura 43 é possível observar o modelo de carregamento adoptado para o comboio Thalys.

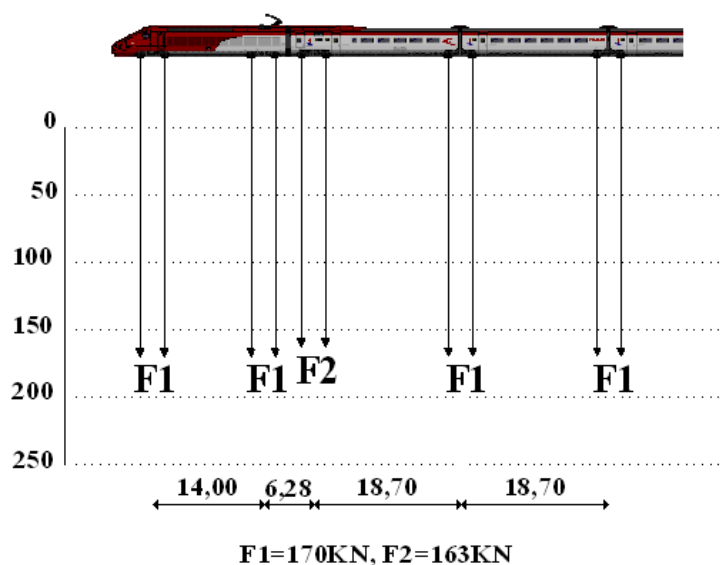


Figura 43 – Modelo do carregamento adoptado referente ao comboio Thalys

Comboio Virgin



Figura 44 – Comboio Virgin (EMU) a circular em Ashton, Reino Unido

(Fonte: I. Leech – www.railpictures.net)

O British Rail Class 390, popularmente conhecido por Pendolino, é o comboio Virgin mais rápido a circular no Reino Unido. A velocidade máxima deste comboio é de 225 km/h, no entanto devido a limitações de sinalização das vias, esta velocidade encontra-se condicionada a 200 km/h. As composições mais vulgares são constituídas por 7 e 9 carruagens, permitindo transportar 363 e 441 passageiros, respectivamente. O modelo adoptado no cálculo é formado por uma composição de duas automotoras e 11 carruagens intermédias (Figura 45).



Figura 45 – Comboio Virgin adoptado nas simulações

O Virgin é um comboio convencional que dispõe de dois bogies por carruagem. Cada bogie é composto por dois eixos afastados de 2,70 m entre si e em que cada um deles exerce uma força de 170 kN (Figura 46). O afastamento entre os centros dos bogies da mesma carruagem e de carruagens adjacentes entre si é de 17,00 m 6,90 m, respectivamente. A extensão entre os eixos das extremidades do comboio é de 258,70 m.

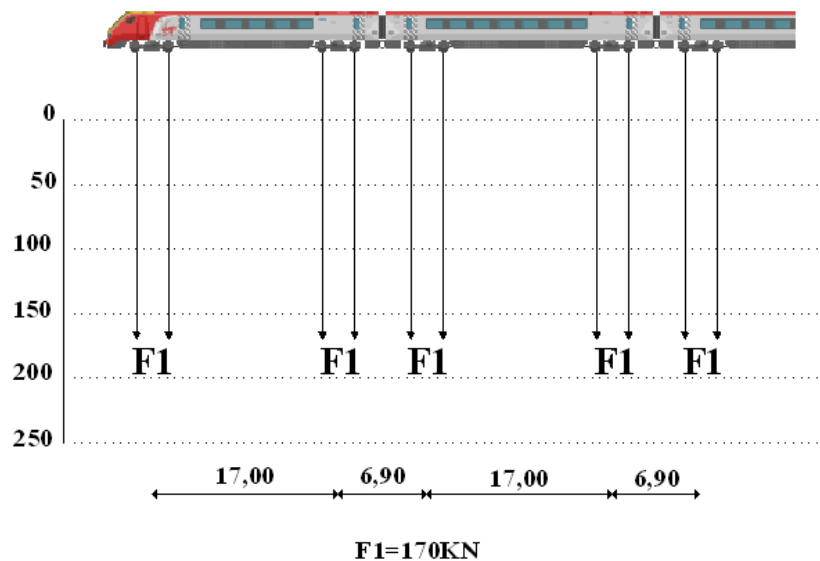


Figura 46 – Modelo do carregamento adoptado no cálculo numérico, referente ao comboio Virgin

3.5 EXPERIÊNCIA COMPUTACIONAL NA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA VIA-FÉRREA

Os programas de cálculo têm sido nos últimos anos uma ferramenta essencial na resolução de problemas de Engenharia, tendo sido largamente utilizada na área da ferrovia para prever efeitos dinâmicos gerados pela passagem de comboios.

Vários autores adoptaram diferentes modelos de computação para prever o comportamento dinâmico das vias. As metodologias aplicadas, podem variar de uns para os outros, mas no entanto em qualquer solução, seja ela numérica ou semi-analítica, deve existir sempre uma fundamentação teórica que tem de ser validade através de resultados experimentais. Este factor é muito importante de modo a credibilizar o modelo de cálculo.

Madshus e Kaynia (1999) adoptaram um programa computacional denominado por VIBTRAIN, que permite simular e analisar a resposta do sistema carris-aterro-macizo à passagem de comboios de AV. O programa é formulado através de uma subestruturação em que o macizo é discretizado através de funções de Green num semi-espaço e o sistema carris-aterro é representado através de uma viga modelada por elementos finitos (Figura 47). Os autores aplicaram este modelo, nomeadamente ao caso de Ledsgard.

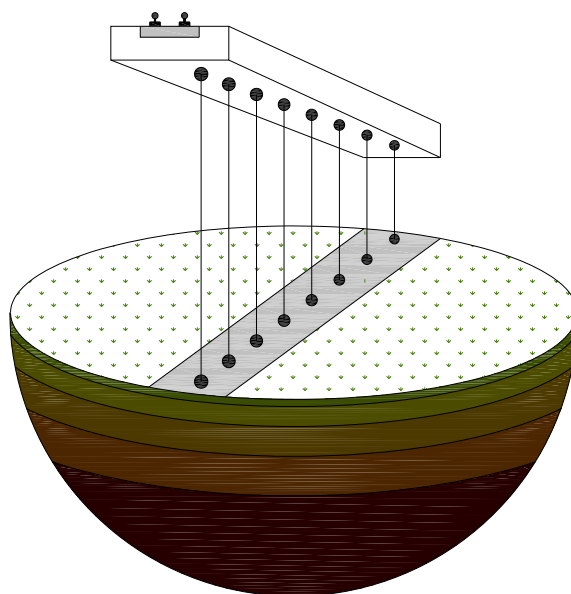


Figura 47 – Viga equivalente em elementos finitos, representativa do sistema carris-aterro, acoplado às funções de Green, para maciços estratificados

Em Takemiya (2003) é possível observar um modelo de simulação desenvolvido pelo autor para descrever o comportamento vibratório de um meio submetido à passagem de comboios de AV.

Karlström e Boström (2005) e Karlström (2006) aplicaram nas suas investigações soluções semi-analíticas para definir o comportamento dinâmico dos seus modelos.

Alguns estudos recomendados pela BV, para aferir os efeitos dinâmicos da AV em Ledsgard, abrangeram a aplicação exaustiva de um programa de cálculo de elementos finitos, denominado por FLAC3D. Este programa de cálculo permite modelar com perfeição uma estrutura ferroviária e a sua envolvente. É possível introduzir neste tipo de cálculo, diferentes parâmetros de materiais. No caso de Ledsgard, foram considerados apenas as propriedades elásticas dos solos. No entanto foi obtida uma correlação satisfatória entre os parâmetros medidos e os calculados (Holm et al., 2002).

A FEUP também tem apresentado algumas inovações nesta área. Foi implementado no programa de elementos finitos FEMIX um modelo de cálculo no domínio do tempo que permite efectuar uma análise dinâmica com interacção completa comboio-via (Calçada, 2008).

É possível realizar este tipo de investigação, utilizando-se programas de cálculo comerciais, como por exemplo o programa ANSYS. Para o efeito pode recorrer-se a algoritmos de contacto em que os elementos de viga que modelam os carris podem ser definidos como linhas alvo e as rodas do comboio como pontos que estabelecem o contacto (Calçada, 2008).

O código usado neste trabalho, para estudar o comportamento dinâmico do caso de Ledsgard (Capítulo 4), foi desenvolvido na FEUP no programa MATLAB. Este código ainda se encontra em fase de aperfeiçoamento, mas já tem apresentado resultados bastante satisfatórios.

4

ESTUDO DO CASO DE LEDSGARD

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

O caso prático, que seguidamente vai ser exposto, é um caso particular de fenómenos dinâmicos em vias-férreas.

O caso de Ledsgård, já foi alvo de inúmeras investigações e continua a ser actualmente um modelo de referência, para inúmeros estudos nesta área.

A localidade de Ledsgård situa-se na linha da costa ocidental da Suécia, a Norte de Kungsbacka e a cerca de 25 quilómetros a Sul de Gotemburgo. O sítio é próximo do rio Kungsbackaån, no meio de uma grande planície. A superfície do terreno encontra-se mais baixa na proximidade do rio e eleva-se em direcção a Norte.



Figura 48 – Localização de Ledsgård, Suécia (Holm et al., 2002)

As elevadas amplificações que se verificaram neste local, logo após a inauguração da via-férrea e agravadas com o aumento da velocidade de circulação, obrigou à administração ferroviária sueca BV (Banverket), à realização de uma campanha de monitorização do local de modo a compreender a problemática existente e proceder à sua mitigação.

Ao nível da geologia, é possível observar neste local, uma argila orgânica mole (Aluvião) sob uma crosta sobreconsolidada. Abaixo do aluvião encontra-se também uma argila mole. A camada de aluvião deve provavelmente a sua origem ao rio que passa naquela região. Em tempos, o rio deve ter sofrido algum desvio no seu percurso, de maneira que hoje o seu escoamento se realiza para lá dos estratos argilosos, onde actualmente passam as linhas ferroviárias.

Do ponto de vista geotécnico, este local é muito peculiar, com a existência de bolsas de solo orgânico mole (aluvião) com espessuras máximas de 3,00 m abaixo da crosta sobreconsolidada. Estes aluviões surgem numa extensão de aproximadamente 200 m ao longo da via. O limite de liquidez máximo é de 250 % e o teor máximo de matéria orgânica é de 20 %. O aluvião encontra-se sobrejacente a uma argila mole e a profundidade até ao maciço rochoso é superior a 60 m.

Foram efectuados vários ensaios, nomeadamente ensaios de penetração, cross-hole e down-hole para determinar as velocidades de propagação das ondas S (Figura 49) e ensaios laboratoriais, como por exemplo, o ensaio triaxial. A velocidade das ondas S era da ordem dos 40 m/s na camada de aluvião. Na argila subjacente, a velocidade das ondas S era aproximadamente 60 m/s aumentando para 90 m/s à profundidade de 14 m.

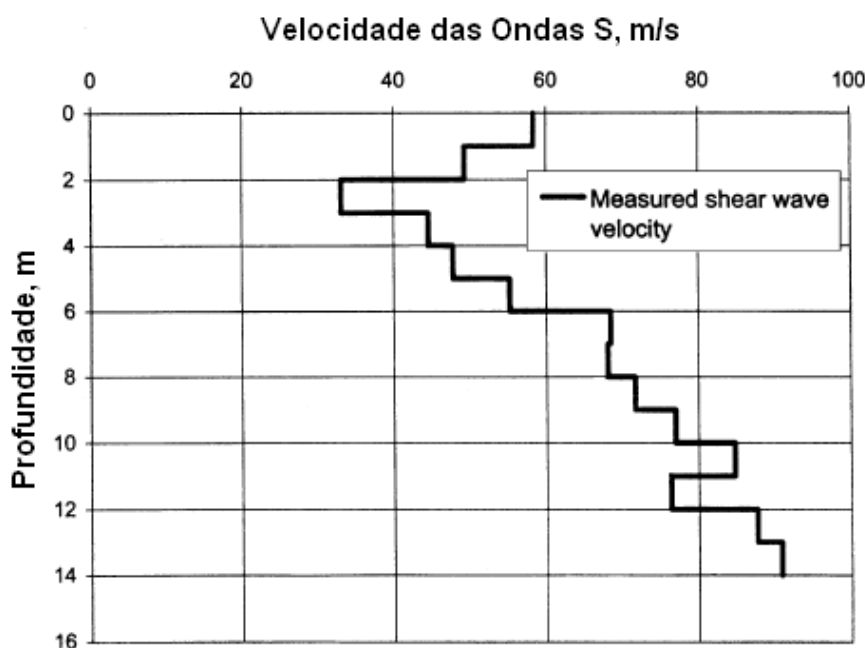


Figura 49 – Exemplo de um gráfico da velocidade das ondas S em função da profundidade

(Adaptado de "Holm et al., 2002")

Devido ao comportamento não linear dos solos, os parâmetros dos materiais estão fortemente dependentes da velocidade de circulação, razão pela qual, foram investigados estes mesmos parâmetros para diferentes velocidades de circulação do comboio X2000, nomeadamente, 70 e 202 km/h. No Quadro 6 apresentam-se, de acordo com o proposto por (Kaynia et al. 2000), as propriedades das formações afectadas para a velocidade de 70 km/h (pequenas deformações) e para a velocidade de

202 km/h (grandes deformações), tendo em conta a dependência da rigidez com o nível de deformação induzida pela passagem do X2000.

Quadro 6 – Propriedades do maciço

Estrato	Possança (m)	Massa volumétrica (kg/m ³)	Pequenas deformações			Grandes deformações		
			V _s (m/s)	V _p (m/s)	β	V _s (m/s)	V _p (m/s)	β
Crosta	1,10	1500	73	500	0,040	65	500	0,063
Argila orgânica	3,00	1260	41	500	0,020	33	500	0,058
Argila 1	4,50	1475	65	1500	0,050	60	1500	0,098
Argila 2	6,00	1475	87	1500	0,050	85	1500	0,064
Semi-indefinido		1475	100	1500	0,050	100	1500	0,060

Admitindo que o solo possa ser assimilado a um meio elástico contínuo, então ondas podem ser relacionadas entre si através da seguinte expressão:

$$V_p = V_s \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (10)$$

A partir da expressão (10) é possível determinar o parâmetro ν do solo por meio da expressão (11).

$$\nu = \frac{1 - 0.5 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2}{1 - \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2} \quad (11)$$

A partir de algumas deduções matemáticas que relacionam a variação temporal com a variação espacial do movimento de partículas, é possível calcular a velocidade de propagação das ondas S através da seguinte expressão:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (12)$$

A equação (12) pode ser expressa em ordem a G através da expressão (13).

$$G = V_s^2 \rho \quad (13)$$

Sabendo que G é uma constante independente e que pode ser relacionada elasticamente num meio isotrópico através da expressão (14), é possível definir o parâmetro E por intermédio da expressão (15).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (14)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (15)$$

A partir do Quadro 6 e das expressões (11), (13) e (15) é possível definir os parâmetros (ν , G , E) do maciço, que vêm indicados no Quadro 7.

Quadro 7 – Parâmetros do maciço

Estrato	Pequenas deformações			Grandes deformações		
	ν	G (MPa)	E (MPa)	ν	G (MPa)	E (MPa)
Crosta	0,49	7,99	23,80	0,49	6,34	18,90
Argila orgânica	0,50	2,12	6,34	0,50	1,37	4,11
Argila 1	0,50	6,23	18,70	0,50	5,31	15,90
Argila 2	0,50	11,20	33,50	0,50	10,70	31,90
Semi-indefinido	0,50	14,80	44,20	0,50	14,80	44,20

No Quadro 8 apresentam-se, de acordo com o proposto por (Kaynia et al. 2000), as propriedades da via para a velocidade de 70 km/h (pequenas deformações) e 202 km/h (grandes deformações).

Quadro 8 – Propriedades da via adoptadas na simulação

Propriedade	Pequenas deformações	Grandes deformações
Largura, (2b) (m)	3,00	3,00
Massa, m (t/m)	10,8	10,8
Rigidez, EI (MNm ²)	200	80
Amortecimento, β	0,10	0,10

4.2 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO ADOPTADAS EM LEDSGARD

Os assentamentos observados em Ledsgard (1997), devido a efeitos dinâmicos, originados pela passagem do comboio X2000, apuraram a necessidade de uma intervenção geotécnica.

O aparecimento deste fenómeno foi uma novidade para a comunidade técnica. A falta de normas e regulamentos sobre esta matéria obrigou a BV produzir uma nota técnica baseada em investigações e estudos recentes. Esta nota técnica propunha algumas metodologias, para mitigar efeitos dinâmicos desta ordem, recomendando preferencialmente os chamados “Depp Mixing Methods” a base de cal e cimento.

A sugestão de esta técnica foi fundamentada pelos bons resultados revelados naquela região, onde a técnica já teria sido aplicada. No entanto houve a necessidade de realizar ensaios laboratoriais, de modo a analisar os efeitos produzidos pelo tratamento, particularmente na argila orgânica. Relativamente à rigidez e à resistência ao corte não drenada, estas foram avaliadas através de ensaios de compressão não confinados. Os resultados dos ensaios permitiram traçar curvas tensão-deformação, a partir das quais era possível determinar o módulo de deformação (Holm et al., 2002).

A avaliação dos efeitos dinâmicos e as correspondentes técnicas de mitigação, permitiram concluir que os parâmetros mais importantes são a rigidez das diversas componentes da via-férrea e do próprio solo. A rigidez, em conjunto com a geometria e a densidade do solo, permite controlar a velocidade das ondas, que por sua vez apura as deformações e as velocidades críticas de todo o sistema. A BV levou a cabo vários estudos e investigações para aferir as propriedades dos solos de Ledsgard, enquanto que as propriedades mecânicas, do material da estrutura ferroviária, foram deduzidas através de métodos empíricos (Holm et al., 2002).

Foram adoptados vários métodos para simular diferentes técnicas de melhoramento do terreno. Inicialmente e com base nas recomendações da nota técnica, foram efectuadas algumas aproximações, incrementando a rigidez ou fazendo variar a resistência do solo dentro de um determinado intervalo de valores. Considerou-se o aumento da rigidez proporcional ao aumento da resistência, que de um modo geral seria cerca de dez vezes superior à resistência do solo instável. Com esta aproximação, a percentagem de solo a estabilizar rondava os 40% (Holm et al., 2002).

Após terem sido analisadas as diferentes hipóteses de melhoramento dos solos de Ledsgard e tendo em conta as recomendações da nota técnica da BV, procedeu-se então, à aplicação da tecnologia DMM. Seria eventualmente possível aplicar outras técnicas de melhoramento, como por exemplo, executar uma viga apoiada numa estrutura de betão, de modo a aumentar a rigidez da via. Na fase de projecto, foram realizados alguns cálculos de modo a simular o comportamento de uma estrutura deste género, adoptando uma rigidez proporcional a uma viga com uma espessura de 0,45 m. Apesar de não ter sido a técnica adoptada, o modelo apresentou resultados bastante satisfatórios.

O DMM é uma tecnologia de tratamento de solos, que teve a sua origem na Suécia. Contudo, além da Suécia, esta técnica também tem sido seriamente explorada e desenvolvida no Japão. Foi de longe a metodologia mais adoptada, entre 1980 e 1990 na Suécia, Noruega e Finlândia. O tratamento consiste em misturar mecanicamente um aditivo (seco) no solo em profundidade, através de um equipamento apropriado. Este aditivo vai produzir uma reacção no maciço, ao misturar-se com a água existente no solo. Os aditivos mais frequentes são, o cimento, cal viva, escórias de alto forno, cinzas, gesso e bentonite. Esta técnica pode ser aplicada nos mais diversos tipos de solos, como por exemplo, turfas, argilas (orgânicas e inorgânicas) e ainda em argilas e areias siltosas e/ou arenosas com teor em água superior a 30 % (Kuokkanen, 2006).

Na Figura 50 é possível observar o equipamento adoptado no tratamento dos solos de Ledsgard, sendo ainda possível visualizar o estado hídrico do terreno naquele local.



Figura 50 – Equipamento adoptado no tratamento dos solos de Ledsgard (Madshus et al., 2004)

Os requisitos mais importantes no tratamento de solos através de DMM são a definição da quantidade e da proporção dos constituintes do ligante e ainda a energia de mistura. Numa fase inicial, foi adoptado uma porção de 150 kg de ligante por m^3 nos solos orgânicos, com uma relação de cal viva/cimento de 27/75. Esta proporção reduzia para 50% na vizinhança destes aluviões, diminuindo o aglutinante para 120 kg/m^3 (Holm et al., 2002).

As colunas foram fabricadas de duas maneiras distintas, sendo parte delas implantadas isoladamente enquanto que as restantes foram construídas agrupadamente (colunas secantes), de maneira a formar uma cortina (Figura 51a). As colunas secantes formavam uma malha do tipo “escada”, com duas paredes longitudinais de profundidades até 7,00 m e diversas paredes transversais com profundidades abaixo da via até 6,00 m.

No entanto, em cada duas colunas longitudinais, uma delas era fundada até à profundidade de 13,00 m, de modo a adaptar-se ao reforço existente de uma ponte que se encontrava na proximidade e ainda para controlar eficazmente os assentamentos (Figura 51b). Foram realizadas no total 13000 m de colunas com diâmetros de 600 mm e comprimento médio de 7,60 m (Holm et al., 2002).

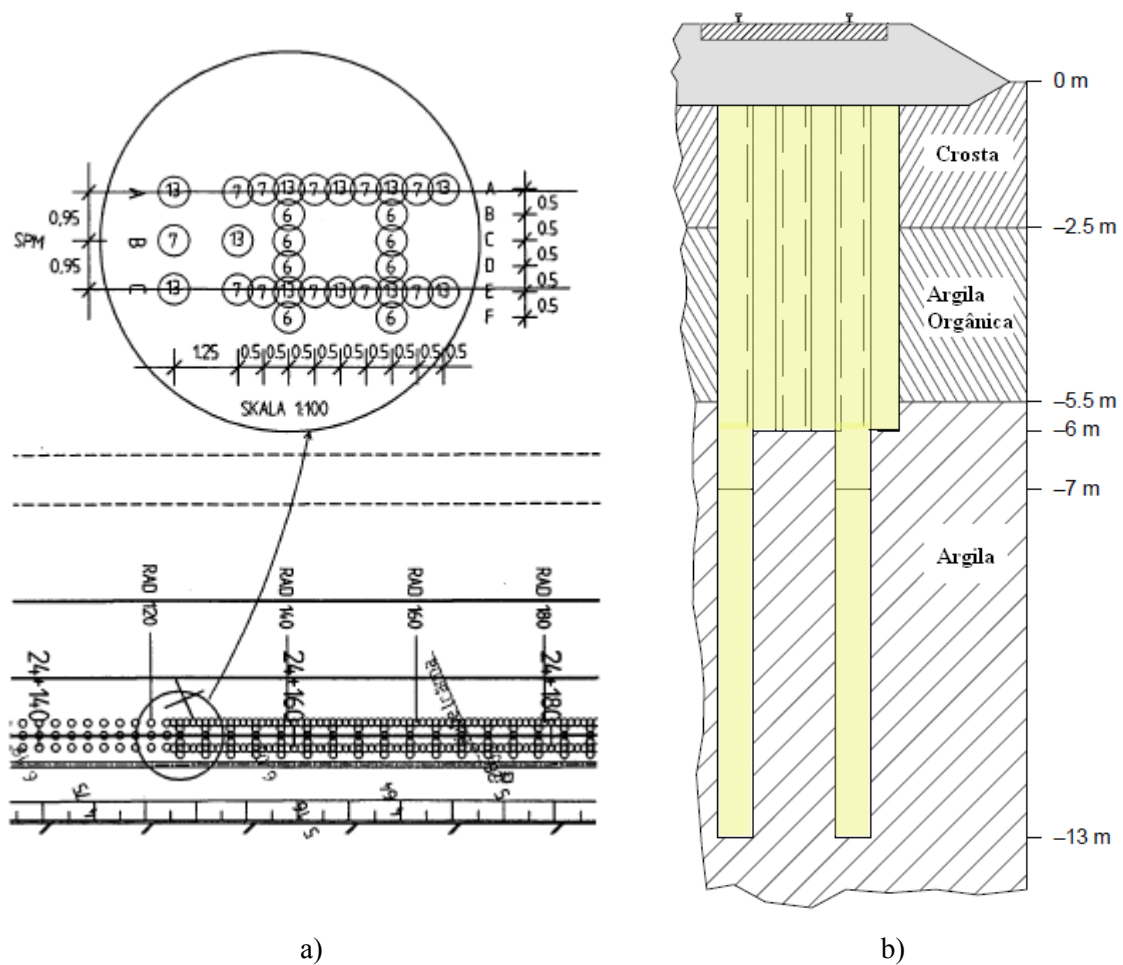


Figura 51 – Tratamento aplicado em Ledsgard à base de colunas de cal/cimento: a) Planta da zona a tratar (Holm et al., 2002); b) Profundidade das colunas de tratamento (Adaptado de “Madshus et al.”, 2004)

Relativamente ao ritmo dos trabalhos, este rondava os 1000 m de perfuração em aproximadamente 16 horas, o que equivale a um rendimento médio de 62,50 m/h.

A obra foi submetida a um rigoroso plano de monitorização de modo a alertar para qualquer eventualidade. Essas observações prolongaram-se para além do período da conclusão da obra. Os resultados das monitorizações permitiram comprovar a eficácia do tratamento efectuado ao longo da via. As deflexões, para baixas velocidades de circulação, reduziram de aproximadamente 4 mm para 0,8 mm, o que corresponde a um factor de redução igual a 5 (Holm et al., 2002). Para velocidades superiores, o tratamento foi ainda mais eficiente, uma que vez os deslocamentos da plataforma desaparecerem quase por completo, reduzindo as amplificações verticais cerca de 15 e 20 vezes, como se pode ver na Figura 52.

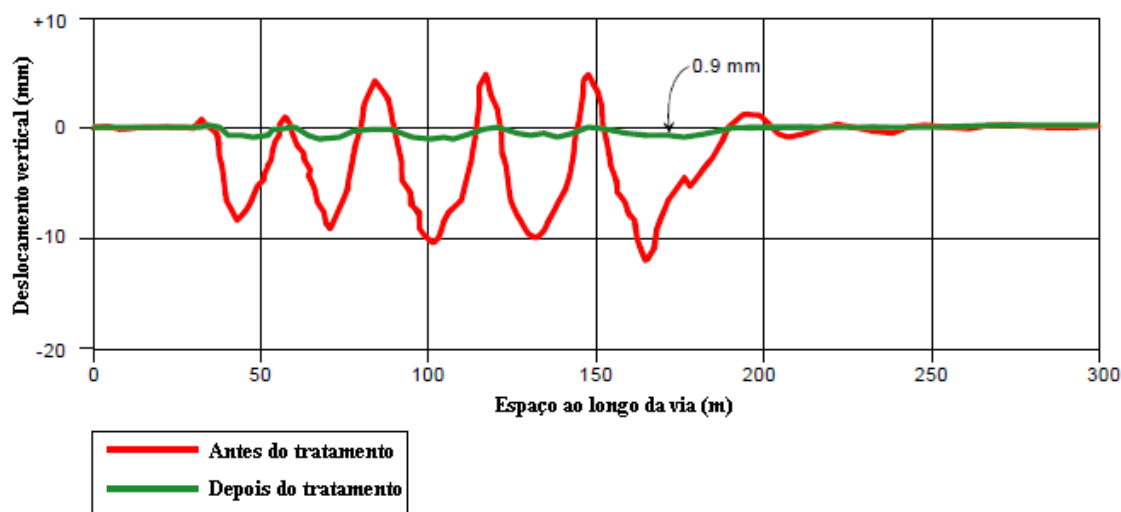


Figura 52 – Amplificações observadas em Ledsgard, antes e após o tratamento do solo, para uma velocidade de circulação do comboio X2000 da ordem dos 200 km/h

(Adaptado de “Madshus et al.”, 2004)

4.3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

Para avaliar o comportamento dinâmico do caso de obra em estudo, foi elaborada uma discretização do maciço, até à profundidade de 14,60 m, através de elementos unidireccionais. Foram considerados 59 elementos de 3 nós, com 2 pontos de Gauss. As propriedades dos elementos foram atribuídas de acordo com o Quadro 6 e Quadro 7, atendendo à degradação da via em função da velocidade. Relativamente à via, adoptou-se uma modelação de acordo com a teoria da viga de Bernoulli-Euler.

Numa fase inicial, adoptou-se duas malhas com o mesmo número de elementos, mas com propriedades distintas. Para a velocidade de 70 km/h adoptaram-se as propriedades não degradadas, enquanto que para a velocidade de 202 km/h, as propriedades degradadas. Mais adiante, no estudo paramétrico, é possível verificar que foram efectuadas algumas alterações, tanto ao nível da definição do número de elementos da malha como das propriedades dos elementos.

Não foi tomada em consideração, nas diferentes simulações, a não linearidade da degradação das propriedades em função da velocidade de circulação, razão pela qual foi adoptado constantemente as propriedades degradadas, definidas para a velocidade de 202 km/h.

Na Figura 53 é possível observar as propriedades (não degradadas e degradadas) do maciço. A relação entre o módulo de deformabilidade degradado e o módulo de deformabilidade não degradado é de 0,79 na crosta, 0,65 no estrato de argila orgânica, 0,85 na camada de argila 1, 0,95 na camada de argila 2 e 1,00 no semi-indefinido. Os valores mais baixos ocorrem nos estratos onde se verifica uma diminuição mais acentuada da velocidade das ondas S. Não havendo alteração do coeficiente de poisson, nem da massa volúmica, tem de haver forçosamente uma diminuição do módulo de distorção e do módulo de deformabilidade.

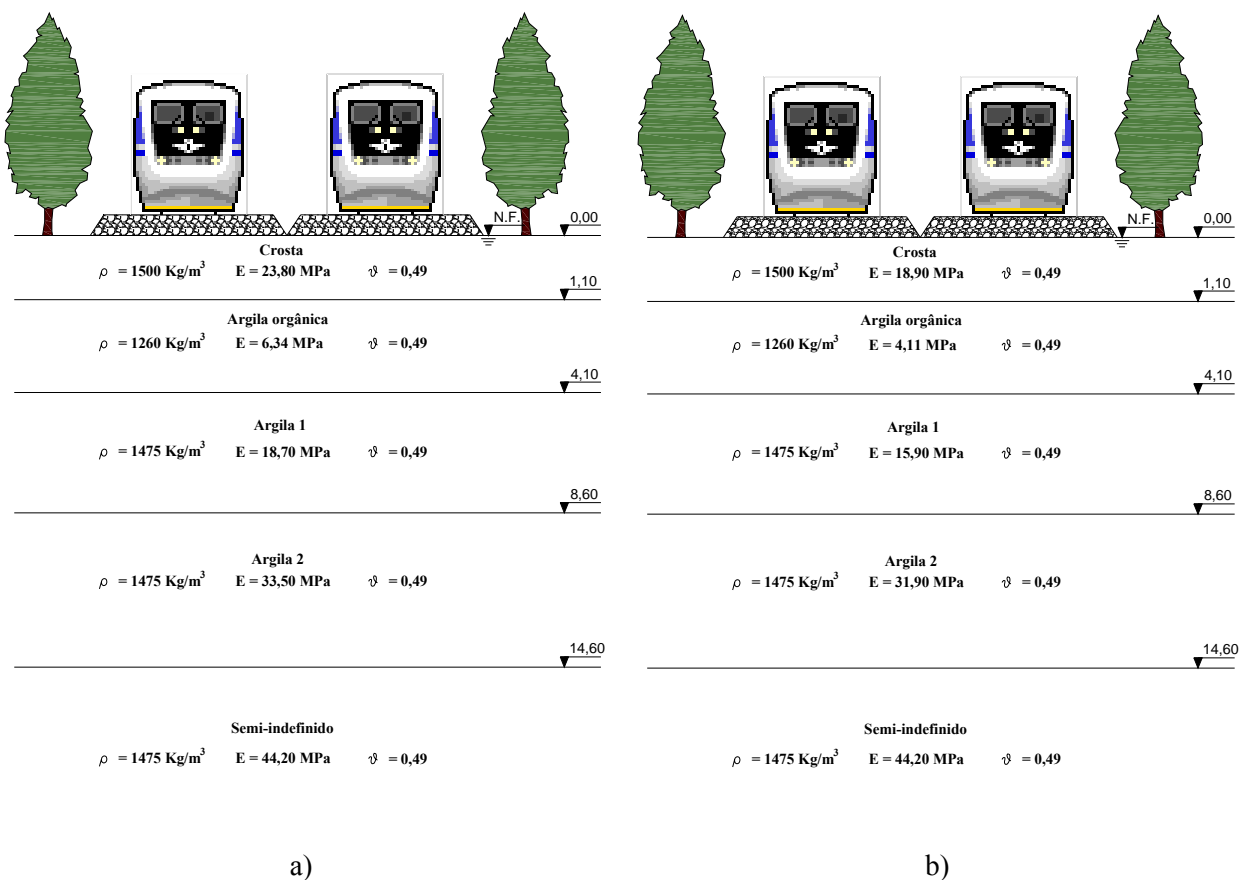


Figura 53 – Propriedades do maciço: a) Domínio das pequenas deformações; b) Domínio das grandes deformações

4.4 VALIDAÇÃO COM BASE EM RESULTADOS DA MONITORIZAÇÃO

Efectuou-se simulações, cujos resultados foram confrontados com dados reais obtidos a partir de ensaios experimentais.

Os resultados experimentais, postos à disposição, foram recolhidos através de observações efectuadas em dois sentidos de circulação (Norte-Sul, Sul-Norte). Esta situação é relevante, uma vez que o comboio X2000 não apresenta uma configuração simétrica ao nível da geometria, o que não ocorre na maioria dos comboios de AV. Esta assimetria, tanto ao nível das cargas por eixo, como dos afastamentos entre bogies, origina comportamentos dinâmicos diferenciados.

Os dados obtidos, da campanha de monitorização, foram recolhidos no sentido Norte-Sul para as velocidades de 70 e 202 km/h e no sentido contrário para a velocidade de 185 km/h. As Figura 55, Figura 56 e Figura 57 apresentam os deslocamentos da via, simulados e medidos, para as velocidades do comboio X2000 de 70, 202 e 185km/h, respectivamente.

Na Figura 55a) considerou-se a interacção entre a via e o solo, tendo em conta o ponto médio (Figura 54a)), enquanto que na Figura 55b) considerou-se a interacção tendo em conta o deslocamento médio (Figura 54b)).

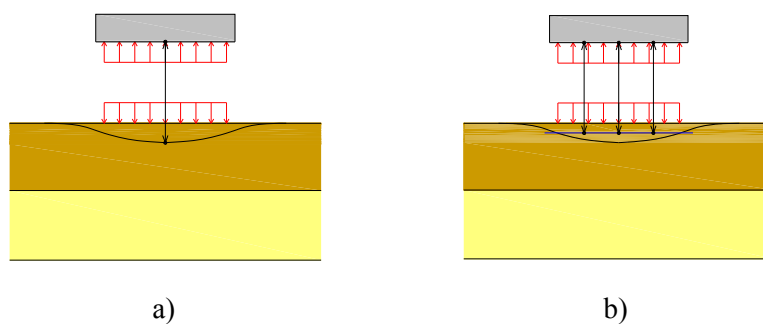
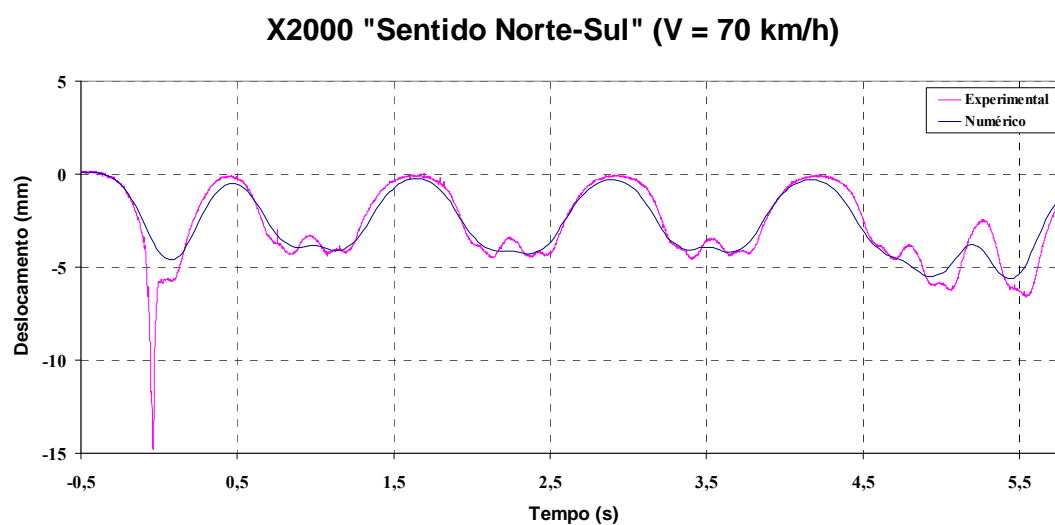
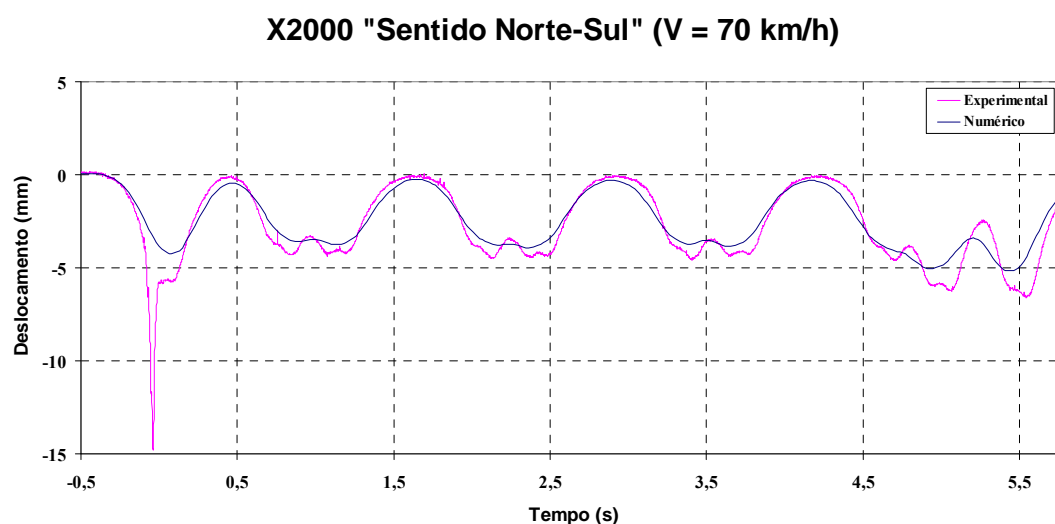


Figura 54 – Esquema de interação: a) Ponto médio; b) Deslocamento médio



a)



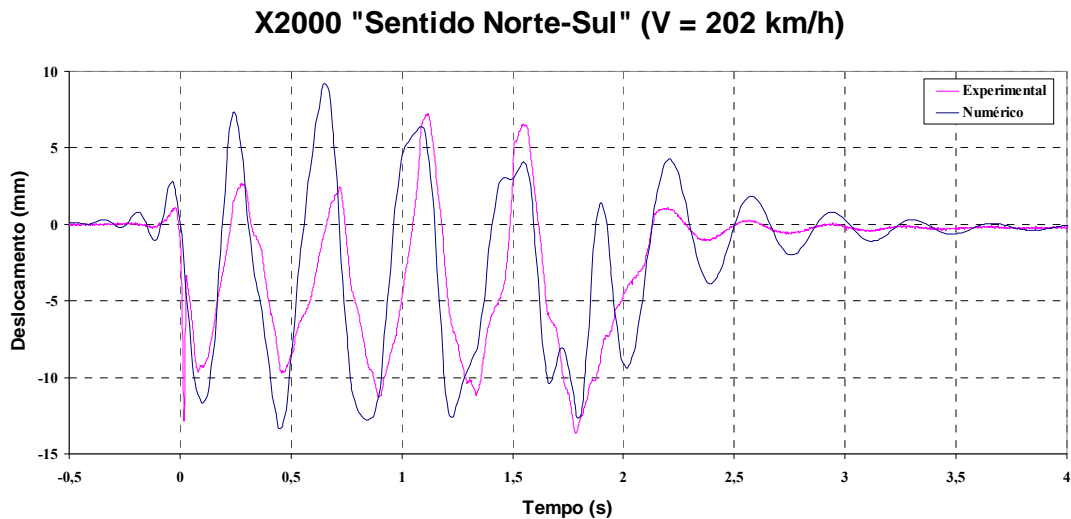
b)

Figura 55 – Comparação da história temporal do deslocamento vertical da via para a velocidade de circulação de 70 km/h: a) Interação tendo em conta o ponto médio; b) Interação tendo em conta o deslocamento médio

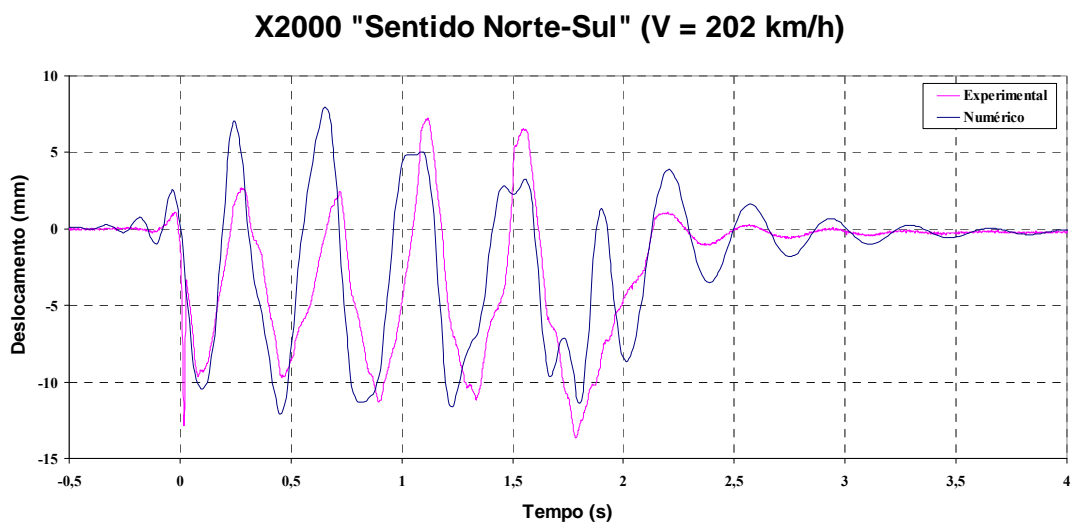
Dado a velocidade de circulação ser reduzida, verifica-se que as deformações se situam no domínio das pequenas deformações, daí ter sido adoptado para o maciço e para a via as propriedades correspondentes à não degradação da rigidez e do amortecimento.

Nas simulações de 185 km/h e 202 km/h, optou-se pelos parâmetros degradados, uma vez que as deformações se encontram no domínio das grandes deformações.

É possível observar na Figura 56, os resultados simulados e experimentais para a velocidade de 202 km/h.



a)



b)

Figura 56 – Comparação da história temporal do deslocamento vertical da via para a velocidade de circulação de 202 km/h: a) Interação tendo em conta o ponto médio; b) Interação tendo em conta o deslocamento médio

Para poder avaliar o comportamento dinâmico a 185 km/h, houve a necessidade de inverter o comboio no modelo de cálculo, uma vez que os resultados experimentais foram obtidos em sentido inverso.

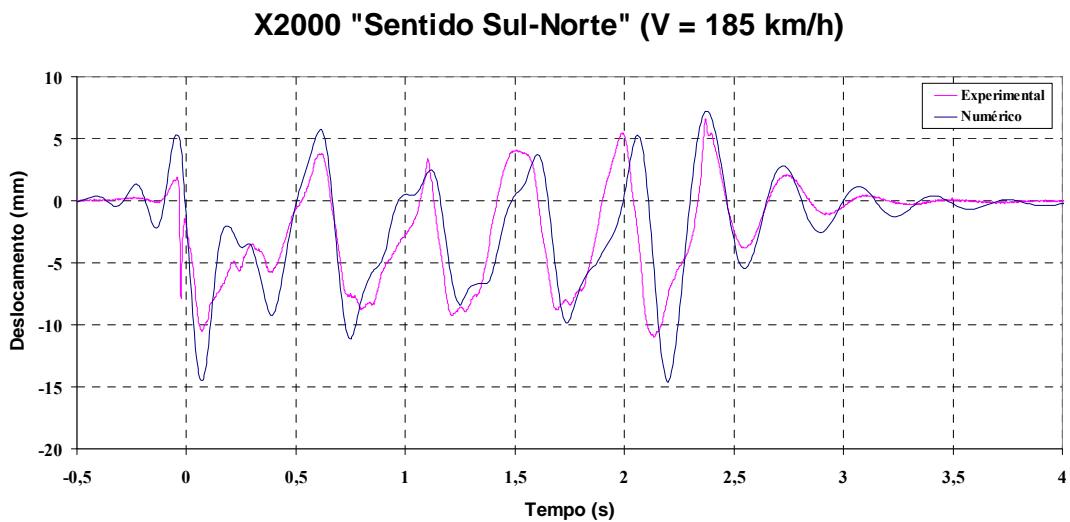
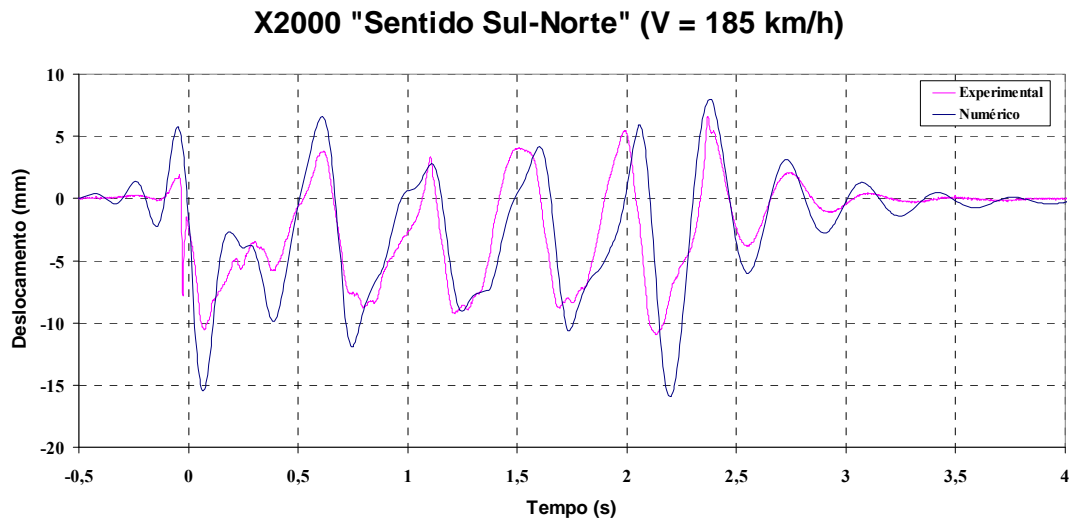


Figura 57 – Comparação da história temporal do deslocamento vertical da via para a velocidade de circulação de 185 km/h: a) Interação tendo em conta o ponto médio; b) Interação tendo em conta o deslocamento médio

Quando o comboio circula à velocidade de 70 km/h, a velocidade de propagação das ondas de Rayleigh em qualquer estrato do maciço é superior à velocidade de circulação do comboio. Como tal o problema é quasi-estático, ou seja a amplificação dinâmica toma pouco significado. Comparando os resultados experimentais com os numéricos é possível verificar uma muito boa concordância, tanto em amplitude como em termos de evolução temporal da resposta.

Segundo Alves Costa (2008), o pico que se verifica nos resultados experimentais aos 0 s, deve provavelmente corresponder a uma perturbação do sistema de instrumentação utilizado, não tendo qualquer significado físico.

Relativamente às velocidades de 185 km/h e 202 km/h é importante relembrar que são superiores à velocidade de propagação das ondas S no estrato de argila orgânica, e como tal a amplificação dinâmica do deslocamento da via é muito significativa, assistindo-se a deslocamentos ascendentes e descendentes superiores a 5 mm e 10 mm, respectivamente.

Pode-se afirmar que a concordância, entre os resultados simulados e experimentais, é satisfatória, contudo essa aproximação não é tão rigorosa, como na situação quasi-estática, onde não existe interferência da componente dinâmica

Caso se considerasse que o maciço se encontrasse fundado num estrato infinitamente rígido, provavelmente seria possível obter amplificações negativas (assentamentos) mais próximas das reais, no entanto as positivas (levantamentos) ficariam ainda mais desajustadas.

A interação tendo em conta o deslocamento médio proporciona, de um modo geral, uma maior aproximação dos deslocamentos, relativamente aos experimentais. Essa aproximação perde o significado no caso do comboio circular à velocidade de 70 km/h, em que a diferença é praticamente desprezável.

4.5 EFEITOS DINÂMICOS NA VIA

Numa primeira perspectiva observou-se o comportamento da via, submetida à passagem de comboios às velocidades de 70 e 202 km/h, uma vez que foram estas as velocidades adoptadas na validação do modelo. Admitiu-se à partida que a condição de fronteira era definida por um semi-espço indefinido.

Para uma velocidade de circulação baixa, como é o caso dos 70 km/h, as deformações da via são essencialmente produzidos por efeitos estáticos, uma vez que a componente dinâmica é praticamente nula. Os deslocamentos produzidos a esta velocidade são negativos, i.e. apenas se verifica assentamentos na via. Na Figura 58 é possível observar um gráfico com as amplitudes dos deslocamentos para a velocidade de 70 km/h em que é efectuada a interação via-solo tendo em conta o ponto médio da via.

Constata-se que as amplitudes mais elevadas ocorrem para os comboios Eurostar, TGV e Thalys. As amplitudes para estes comboios articulados são sensivelmente iguais, uma vez que ambos pertencem à mesma família de comboios, dispondo de uma geometria de carregamento idêntica. As amplitudes são mais elevadas, essencialmente devido às elevadas cargas exercidas na via que são da ordem dos 170 kN/eixo. Outro factor que condiciona os deslocamentos estáticos é o nº de bogies e o afastamento entre eixos. A razão é facilmente perceptível, bastando para tal efectuar uma comparação dos deslocamentos com os obtidos através dos comboios Talgo e Virgin, onde as cargas por eixo são semelhantes mas onde os afastamentos entre bogies reduzem para aproximadamente 13,00 e 17,00 m, respectivamente. Estes factores interferem na função de carga do comboio.

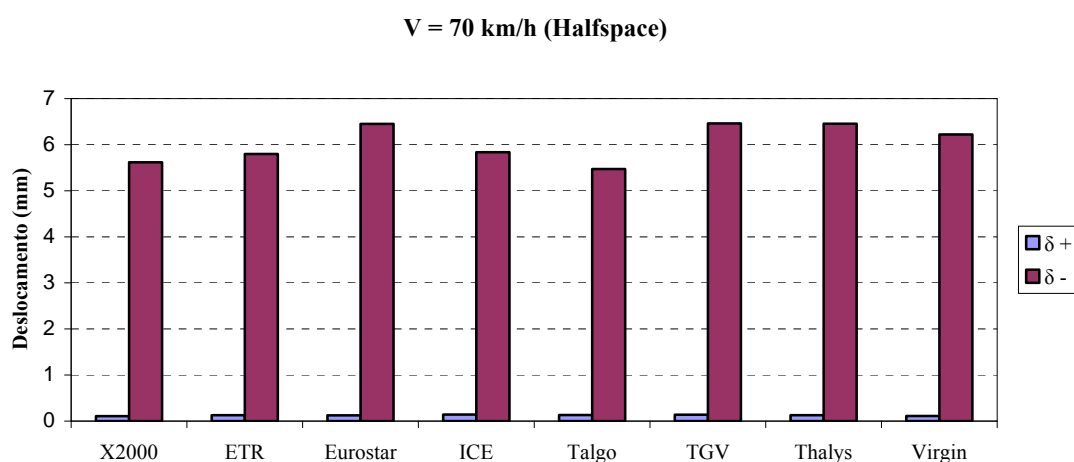


Figura 58 – Gráfico das amplitudes máximas dos deslocamentos verticais no domínio das pequenas deformações para uma velocidade de circulação de 70 km/h

Aumentando a velocidade de 70 km/h para 202 km/h, o cenário muda drasticamente. O movimento do comboio deixa de ser “estático” para passar a ser “dinâmico”. Os deslocamentos verticais aumentaram substancialmente, obtendo para além dos assentamentos, deslocamentos positivos, que correspondem a empolamentos da via. É possível observar na Figura 59 os deslocamentos máximos (positivos e negativos) obtidos ao longo da via para a velocidade de circulação de 202 km/h. A diferença entre as amplitudes é notavelmente diferente em comparação ao caso anterior ($V = 70$ km/h).

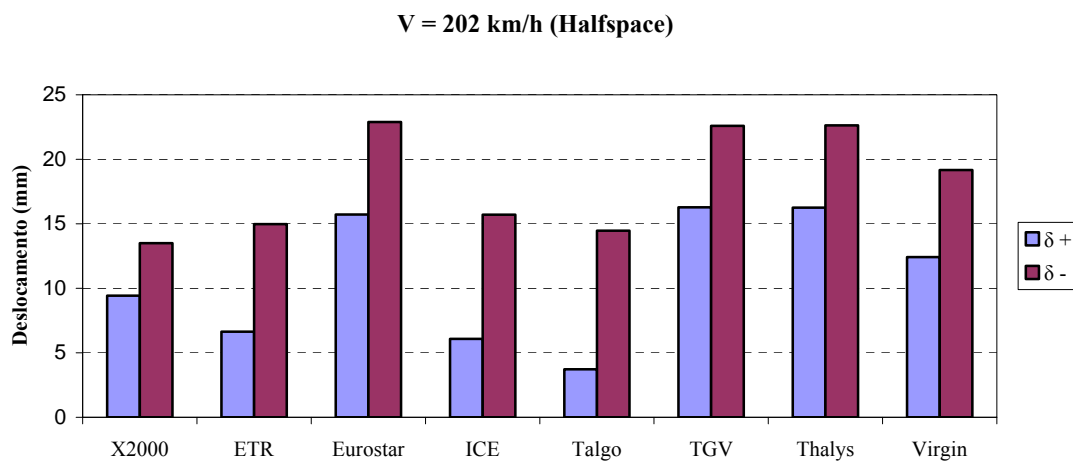
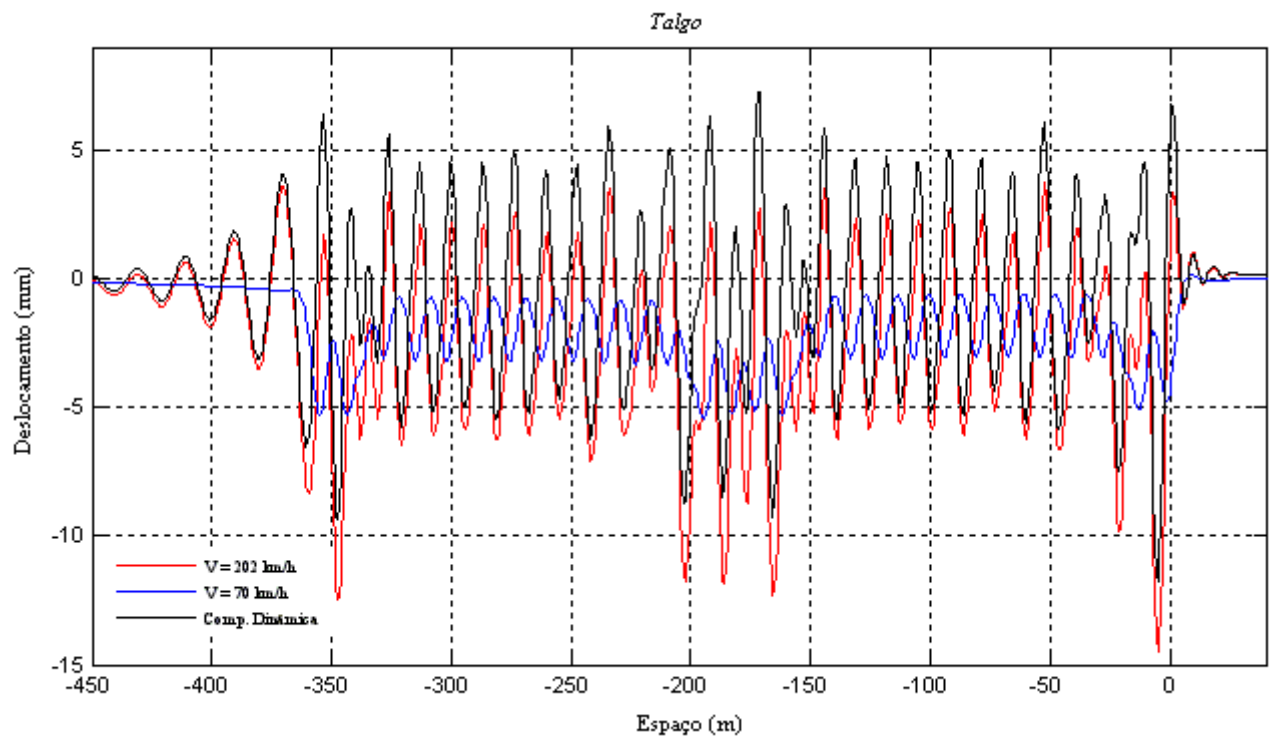
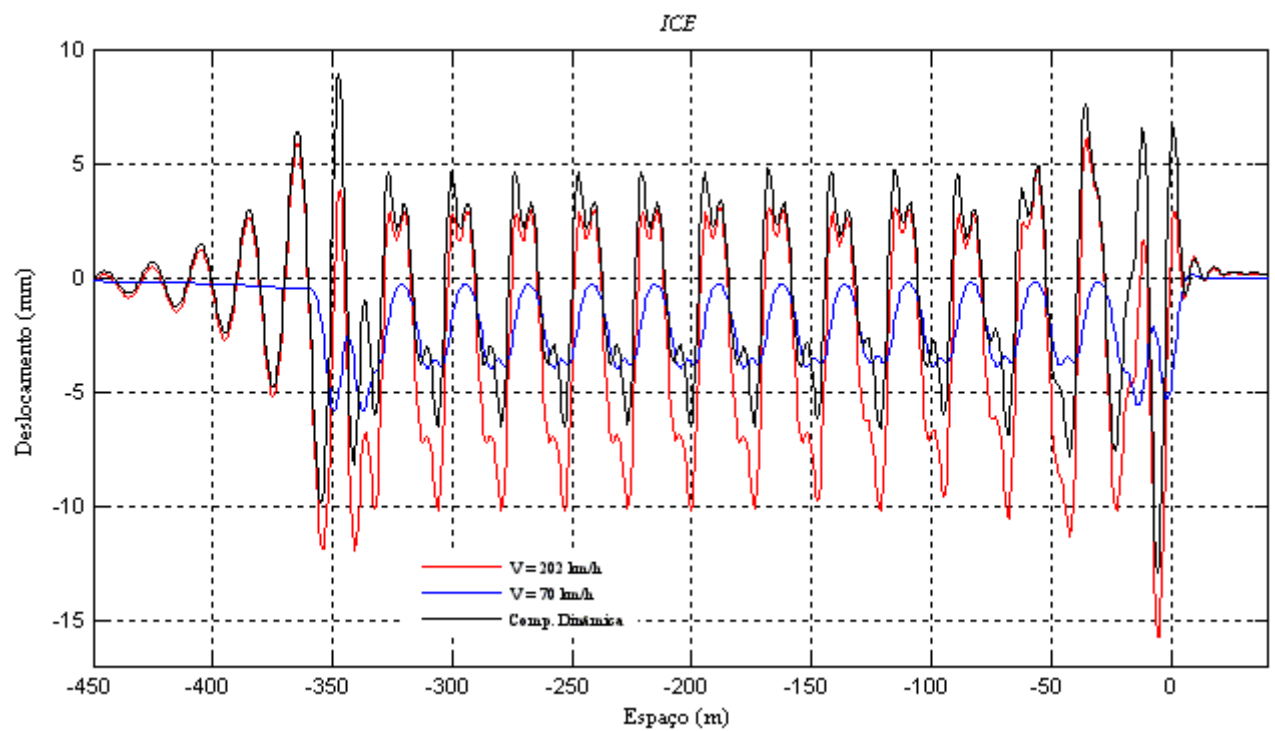


Figura 59 – Gráfico das amplitudes máximas dos deslocamentos verticais no domínio das grandes deformações para uma velocidade de circulação de 202 km/h

O TGV que a 70 km/h apresentava um assentamento máximo ao longo da via de 6,46 mm e um empolamento praticamente desprezável, passou a exibir um assentamento e um empolamento máximo na via de cerca de 22,59 e 16,28 mm, respectivamente. As Figura 60a) e Figura 60b) ilustram a variação espacial do deslocamento para os comboios Talgo e ICE, respectivamente, sendo possível verificar a importância da componente dinâmica na resposta total.



a)



b)

Figura 60 – Componente dinâmica do movimento ao longo da via: a) Talgo; b) ICE

Da Figura 60 é possível constatar, que as ondas no caso do ICE se encontram perfeitamente em fase, enquanto que no Talgo acontece precisamente o contrário.

Para elaborar estes gráficos e extrair a componente dinâmica do movimento, considerou-se que os parâmetros da via, para a velocidade de 70 km/h, eram os correspondentes aos das propriedades não degradadas do sistema via-solo, enquanto que na simulação da velocidade de 202 km/h adoptou-se propriedades degradadas.

No sentido de avaliar essa diferença, efectuou-se simulações para poder ter noção da importância que o factor de degradação tem neste tipo de análise. De qualquer forma os exemplos representados na Figura 61 e Figura 62 não deixam de ter carácter irrealista, uma vez que estamos a considerar parâmetros degradados para uma baixa velocidade de circulação.

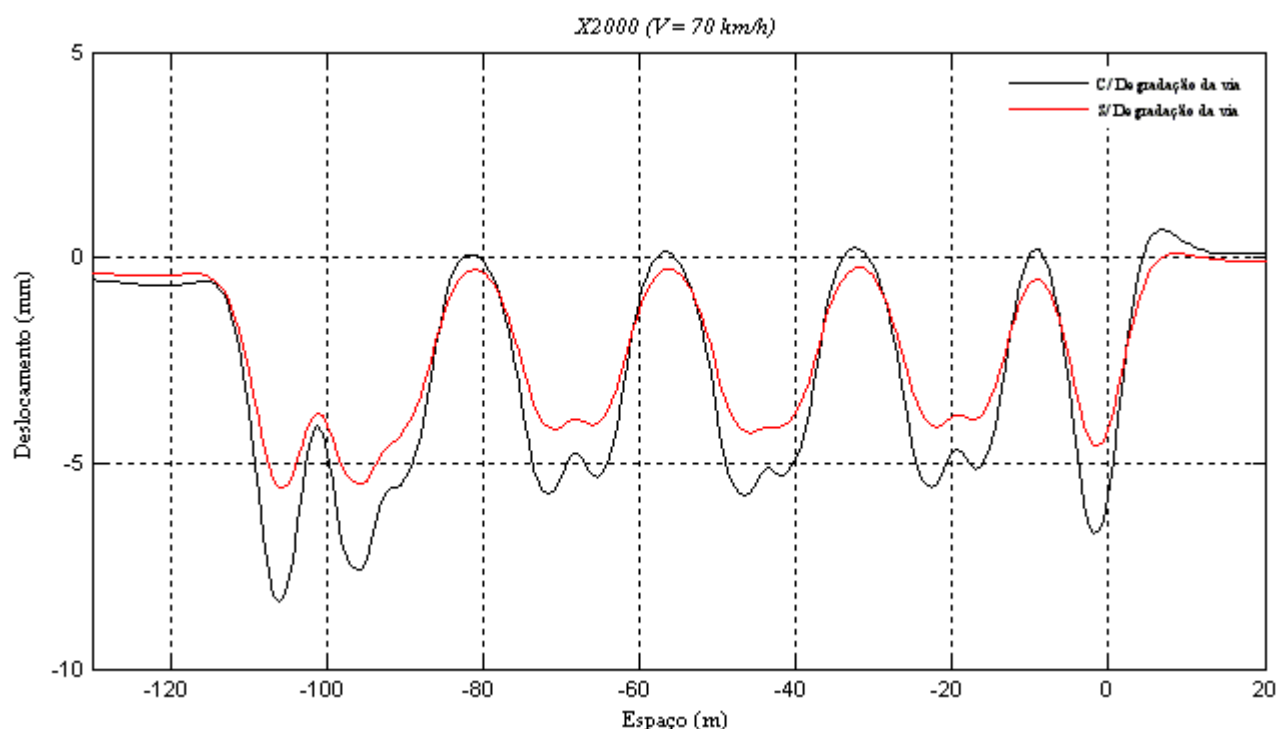


Figura 61 – Deslocamentos verticais ao longo da via, com diferentes níveis de degradação, submetida à passagem do comboio X2000, a uma velocidade de 70 km/h

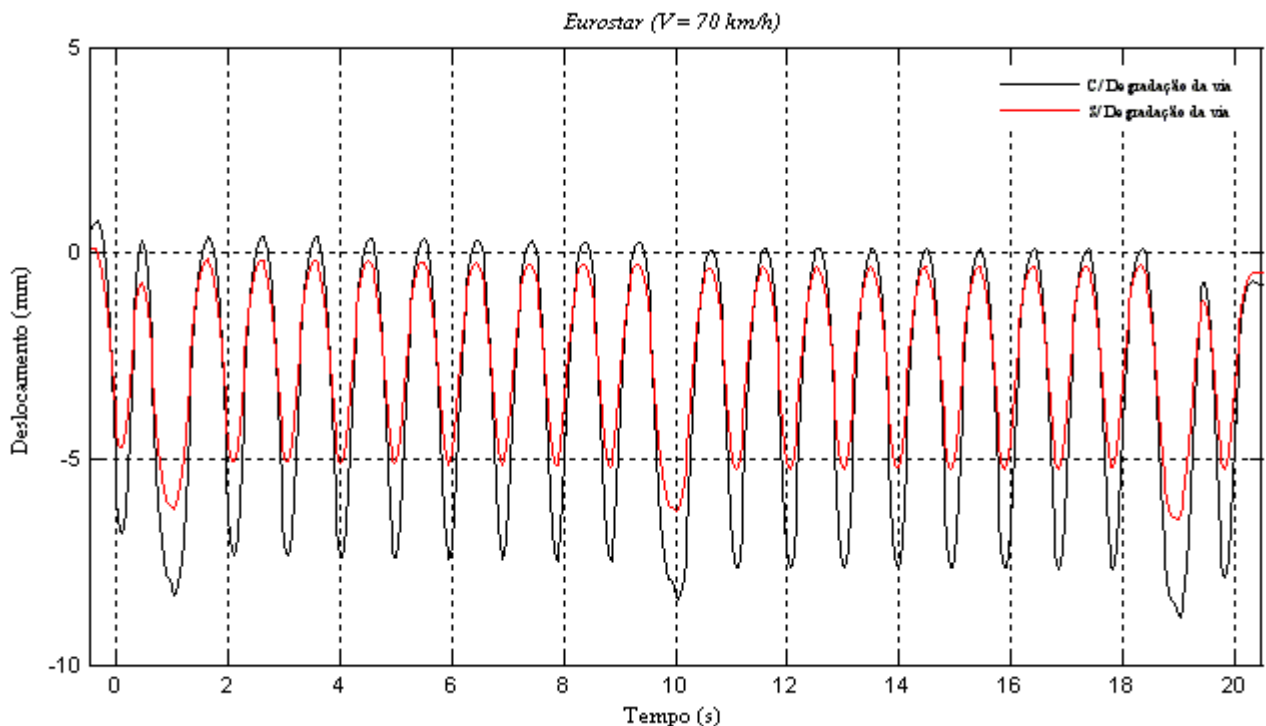


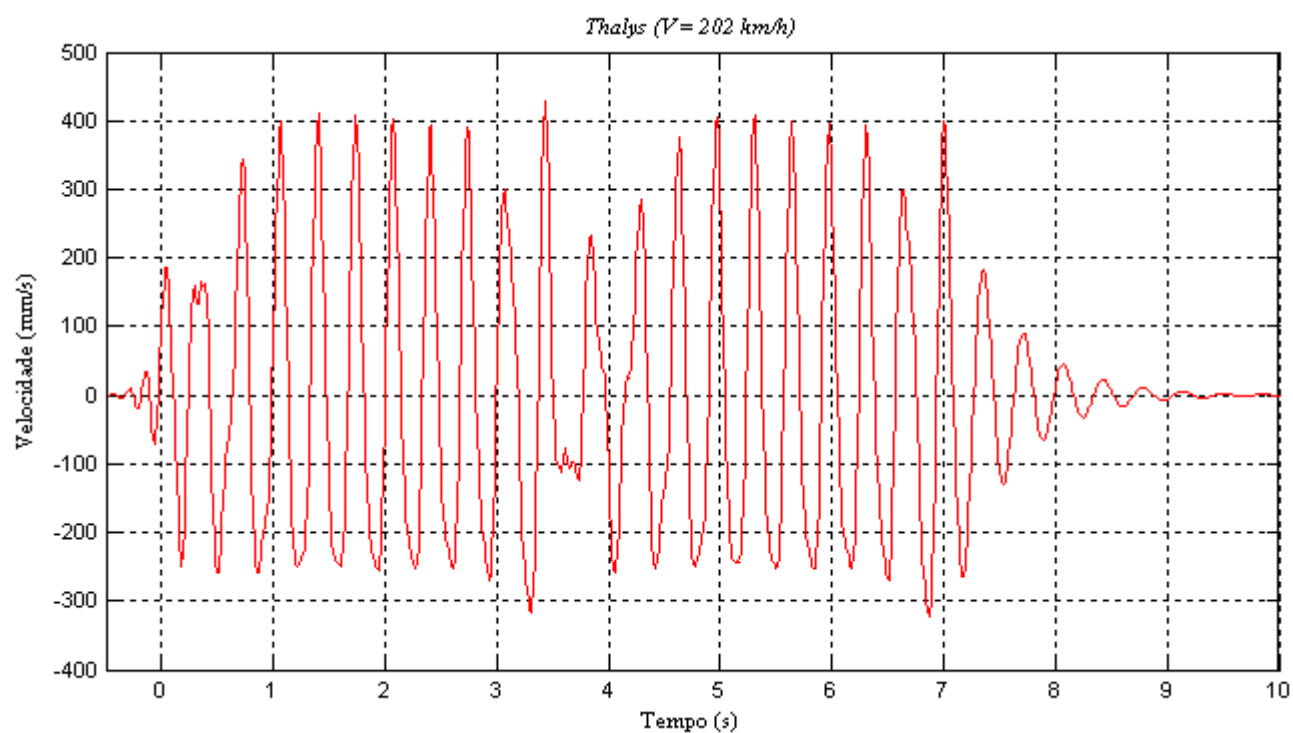
Figura 62 – Comparação da história temporal do deslocamento vertical da via, para diferentes níveis de degradação, submetida à passagem do comboio Eurostar, a uma velocidade de 70 km/h

O efeito da degradação traduz-se essencialmente através da variação da rigidez. É possível constatar que a diminuição deste parâmetro, tanto no maciço como na via, reflecte-se num aumento dos deslocamentos verticais.

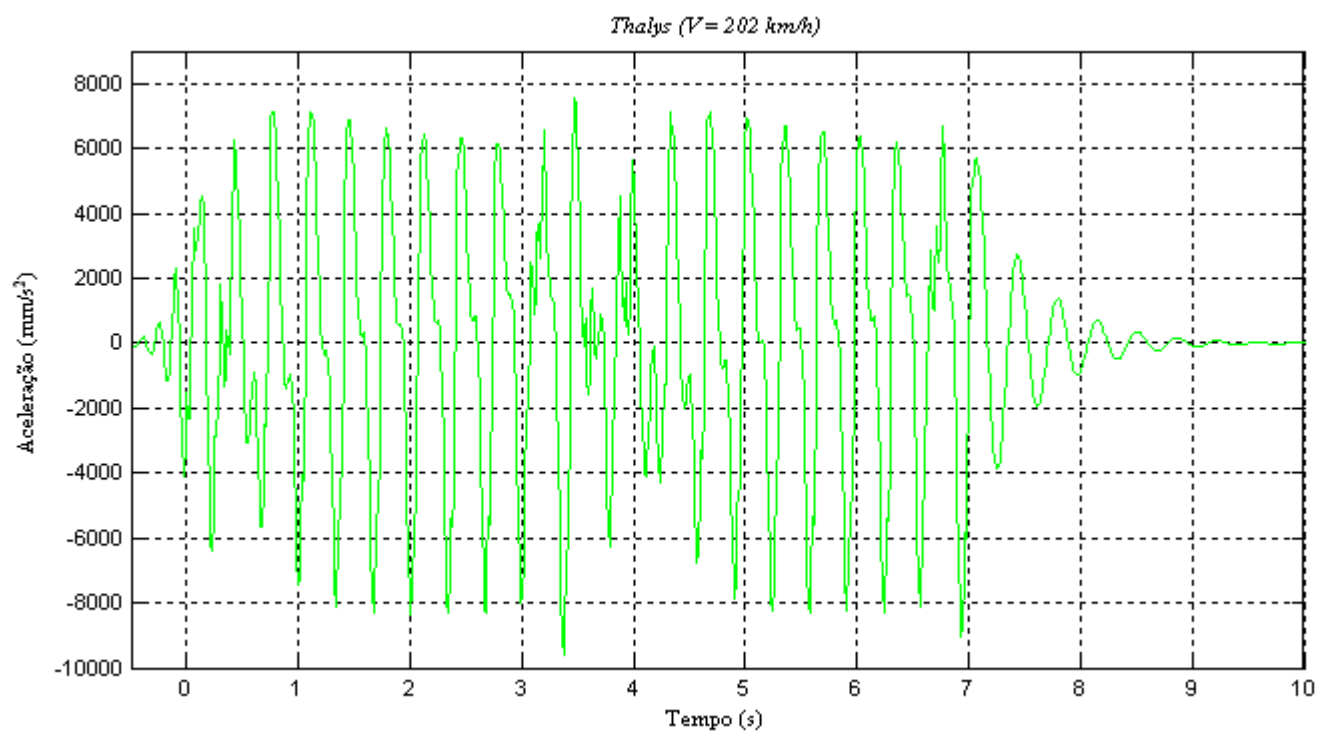
É importante recolher, para além dos deslocamentos, informação relativa às velocidades e acelerações que ocorrem no maciço. Foi efectuada uma extracção desta informação para diferentes velocidades de circulação e para os diversos comboios. Não sendo possível apresentar detalhadamente, todos os gráficos obtidos, optou-se por expor apenas os gráficos da velocidade vertical (Figura 63a) e da aceleração vertical (Figura 63b) referentes à passagem do comboio Thalys a uma velocidade de 202 km/h e globalizar, de uma certa forma, a restante informação através de gráficos da razão entre velocidades e gráficos da razão entre acelerações, de modo a ser mais perceptível a diferença de uns comboios para os outros.

Na elaboração desses gráficos, não se apresentou os resultados para os comboios Eurostar e Thalys, já que ambos são comboios articulados e pertencem à mesma família de comboios do TGV, o que faz com que o comportamento dinâmico seja muito semelhante, uma vez que as características geométricas e de carregamento são idênticas.

Efectuaram-se análises para as velocidades de circulação situadas no intervalo entre os 50 e os 400 km/h, de modo a ser possível representar adequadamente a evolução da amplificação das diferentes componentes do movimento (deslocamentos, velocidades e acelerações), como se pode ver nos gráficos da Figura 64, Figura 65 e Figura 66.

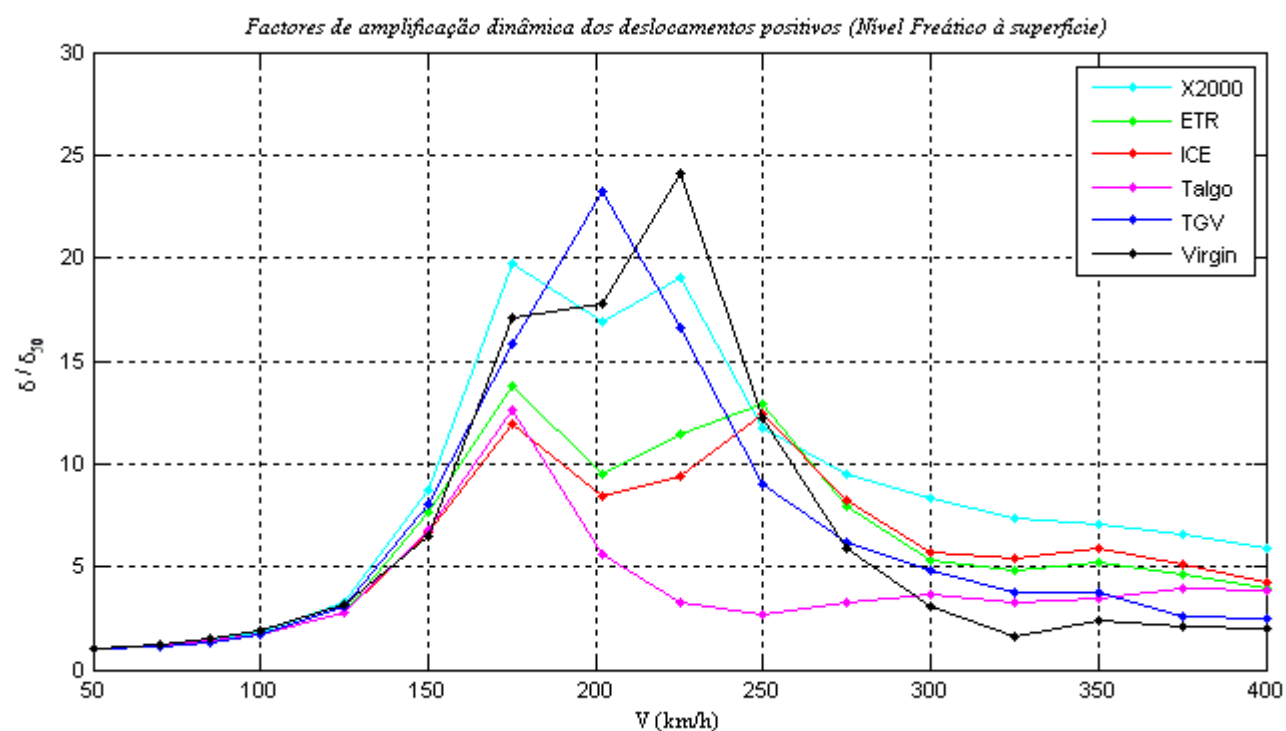


a)

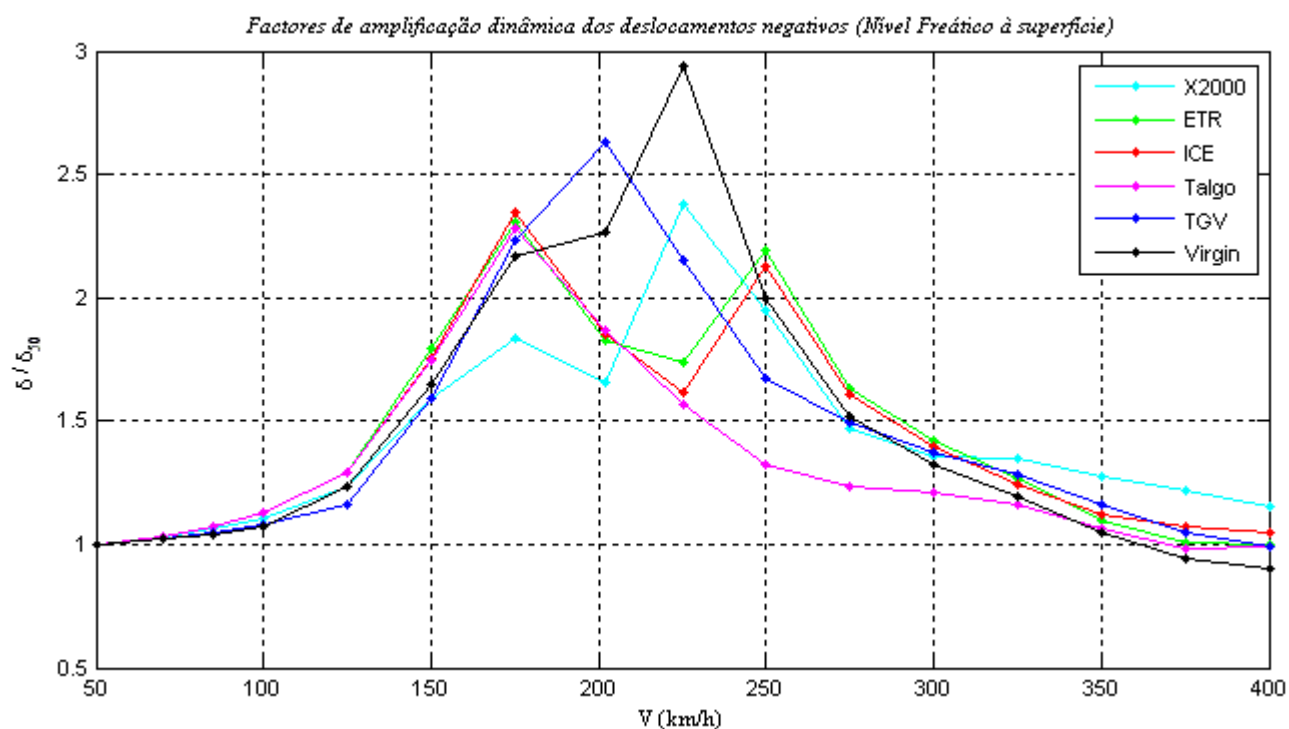


b)

Figura 63 – Passagem do comboio Thalys, a uma velocidade de 202 km/h: a) História temporal da velocidade vertical da via; b) História temporal da aceleração vertical da via

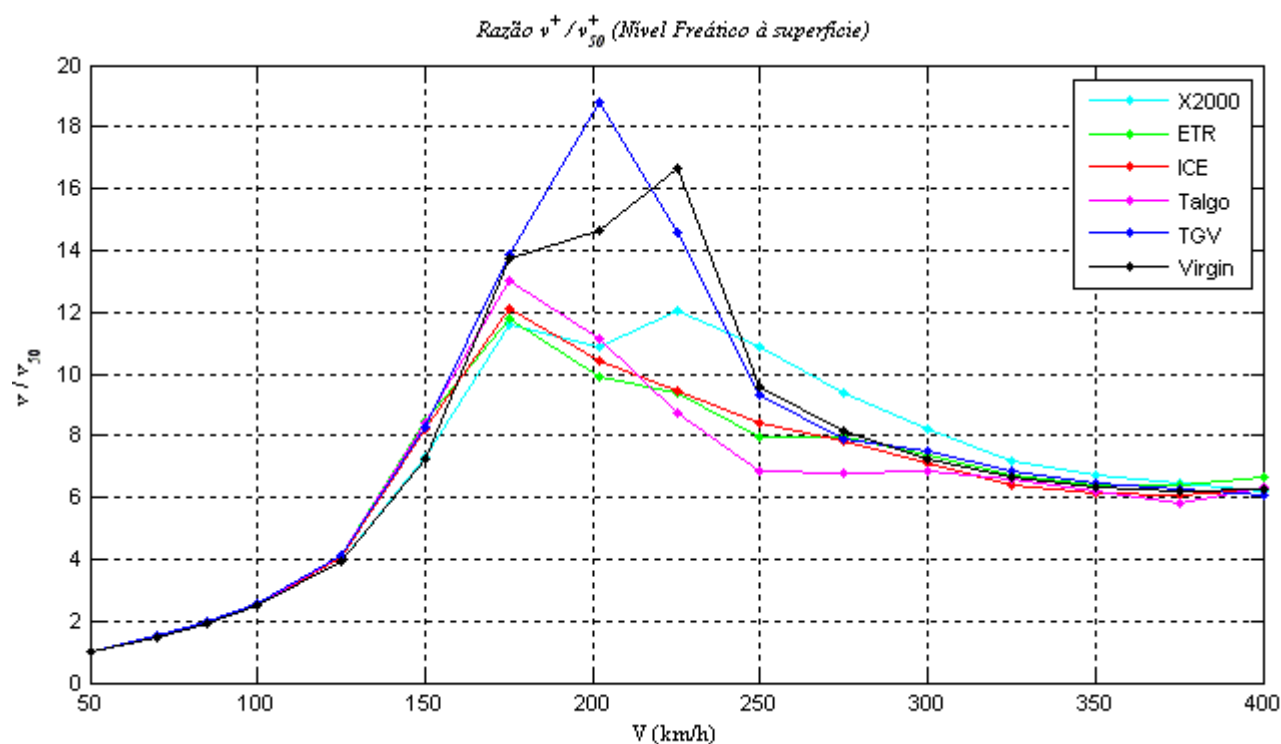


a)

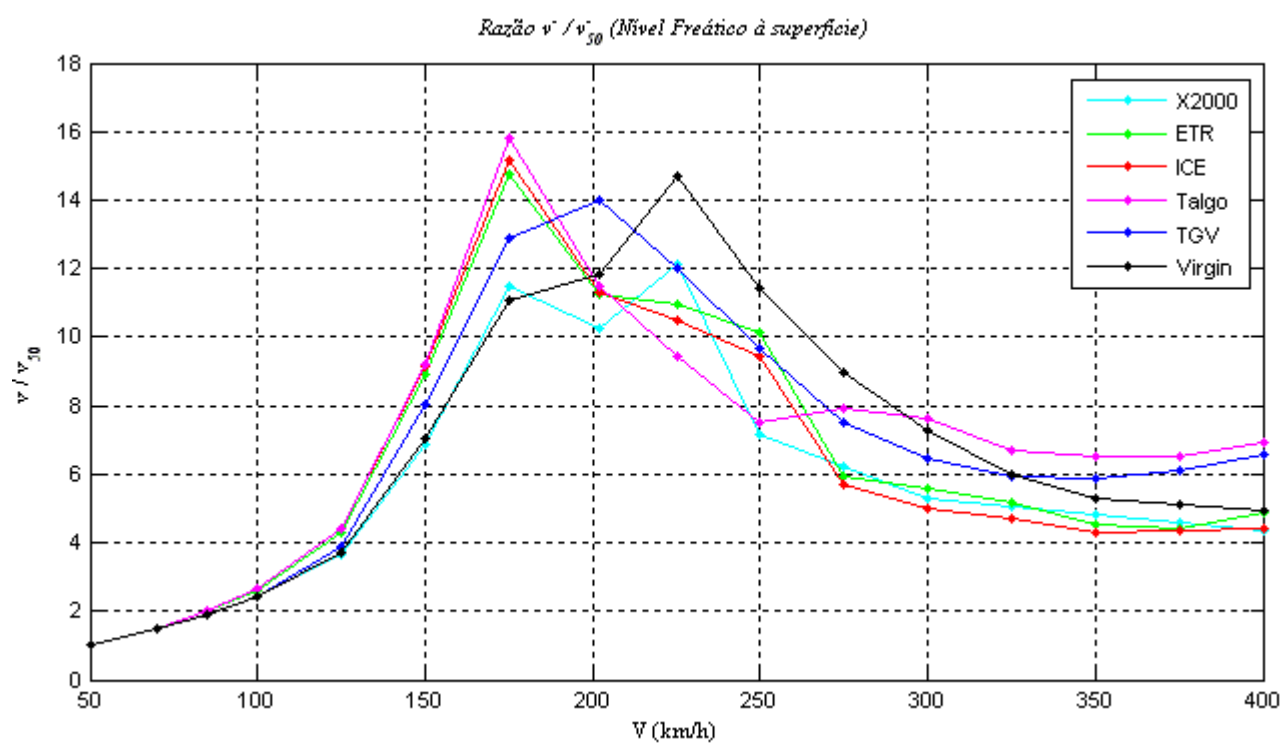


b)

Figura 64 – Factores de amplificação dinâmica dos deslocamentos: a) Deslocamentos Positivos; b) Deslocamentos Negativos

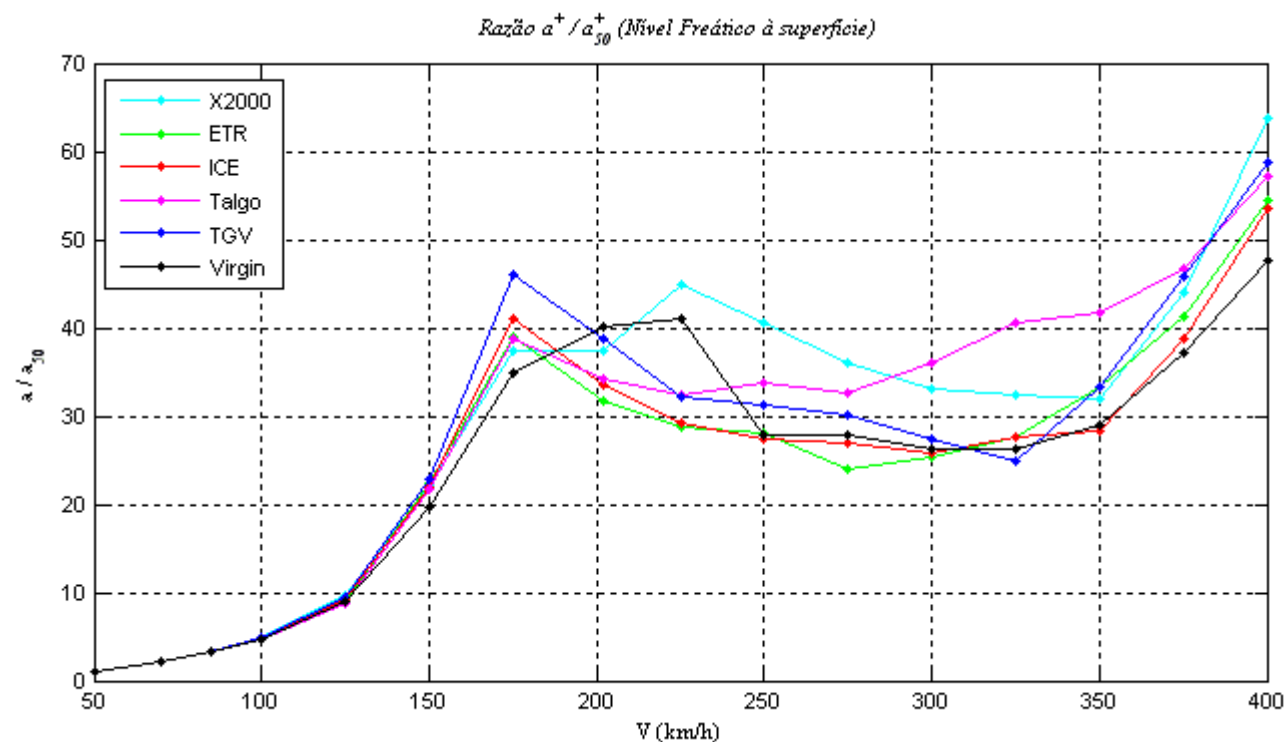


a)

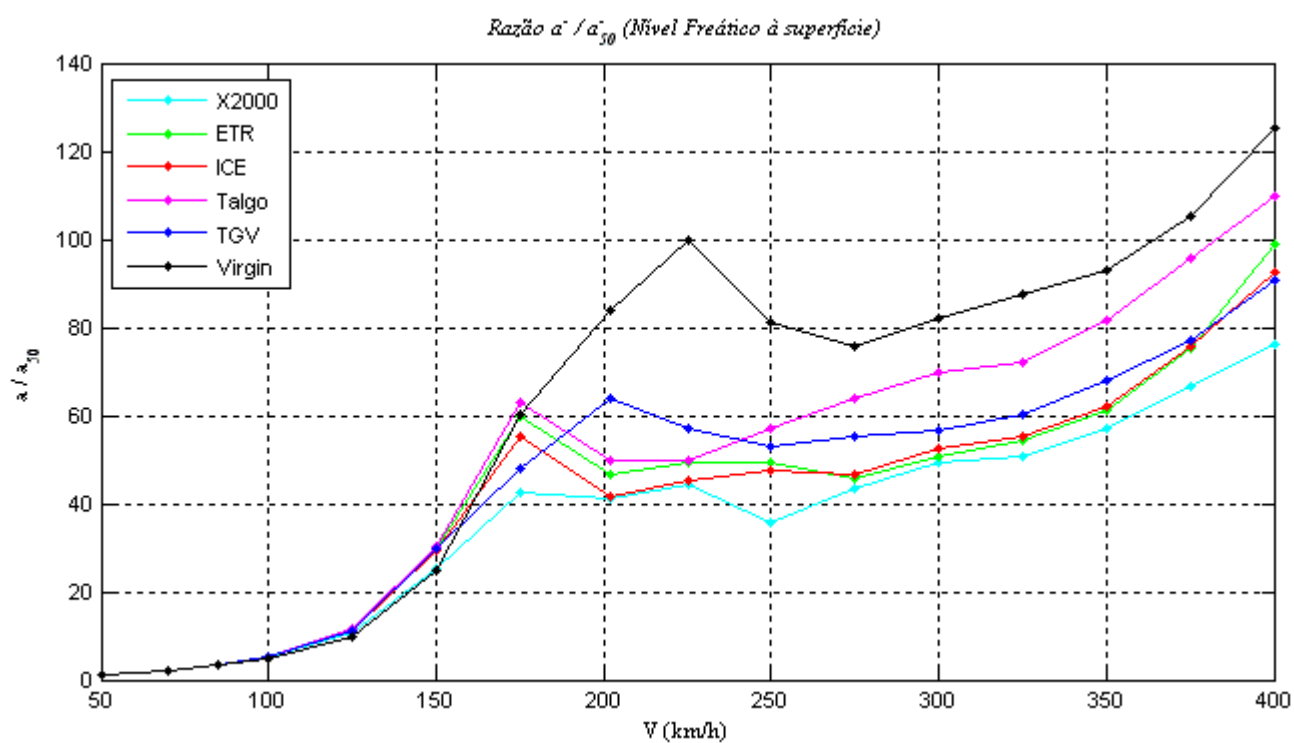


b)

Figura 65 – Razão entre a velocidade vertical a uma dada velocidade de circulação, com a velocidade obtida a 50 km/h: a) Velocidades Positivas; b) Velocidades Negativas



a)



b)

Figura 66 – Razão entre a aceleração vertical a uma dada velocidade de circulação, com a aceleração obtida a 50 km/h: a) Acelerações Positivas; b) Acelerações Negativas

Os factores de amplificação dinâmica, as razões entre velocidades e as razões entre acelerações foram determinados, relacionando os vários parâmetros (deslocamentos, velocidades e acelerações) a uma determinada velocidade de circulação, com os obtidos a 50 km/h, uma vez que a esta velocidade, o comboio apresenta uma componente dinâmica desprezável sendo o movimento caracterizado apenas pela sua componente estática, ou seja, é como se não estivesse em movimento. Desta forma é possível evidenciar a importância que a componente dinâmica apresenta para as diferentes velocidades de circulação.

Ao analisar os gráficos Figura 64, é possível constatar que o intervalo dos factores de amplificação dos deslocamentos é superior no caso dos positivos do que nos negativos. Este fenómeno é facilmente perceptível, uma vez que os deslocamentos positivos para baixas velocidades são quase nulos por se estar em regime quasi-estático. Sendo assim, a existência de deslocamentos verticais positivos para velocidades de circulação superiores (regime dinâmico) leva a um aumento substancial do factor de amplificação, ao contrário do que acontece nos deslocamentos negativos onde em regime quasi-estático se verificam deslocamentos consideráveis, que faz com que essa amplificação não seja tão evidente.

É possível verificar que o intervalo crítico situa-se entre as velocidades de 150 e 250 km/h. Ao efectuar uma comparação entre o TGV e o Virgin constata-se que os factores de amplificação dinâmica ocorrem para velocidades diferentes, nomeadamente 202 e 225 km/h, respectivamente. Estas amplificações são mais elevadas, no caso do comboio Virgin, uma vez que os deslocamentos máximos obtidos a 225 km/h são superiores aos obtidos para o comboio TGV a 202 km/h e os deslocamentos a 50 km/h serem inferiores, aumentando desta forma a relação δ / δ_{50} . No Quadro 9 encontram-se expostos os deslocamentos obtidos para estes comboios à velocidade de 50, 202 e 225 km/h.

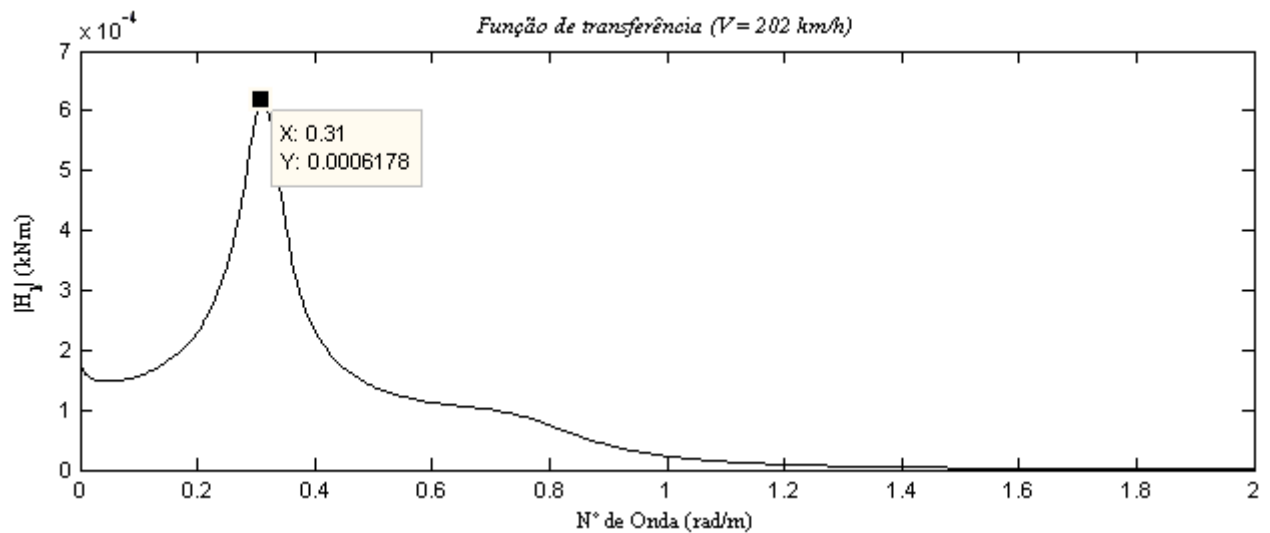
Quadro 9 – Deslocamentos produzidos pelos comboios TGV e VIRGIN para as velocidades de circulação de 50, 202 e 225 km/h

Comboio	V = 50 km/h		V = 202 km/h		V = 225 km/h	
	δ^+ (mm)	δ^- (mm)	δ^+ (mm)	δ^- (mm)	δ^+ (mm)	δ^- (mm)
TGV	0,7016	-8,5943	16,2775	-22,5909	11,6182	-18,5022
Virgin	0,6983	-8,4665	12,4229	-19,1649	16,8417	-24,8975

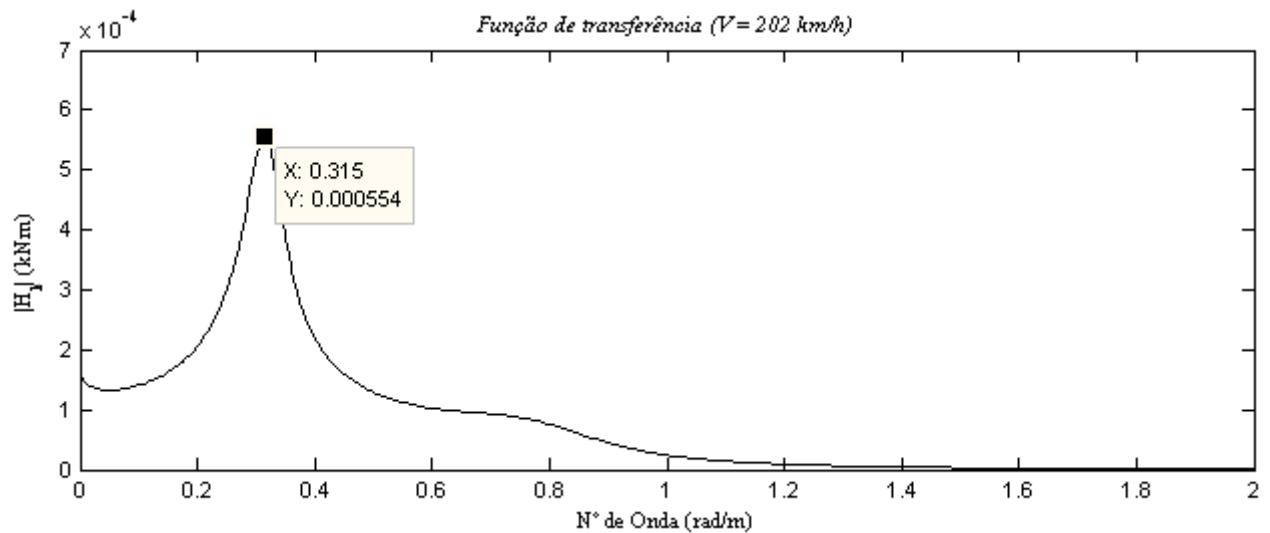
No gráfico da razão das velocidades positivas (Figura 65a) verifica-se uma aproximação das curvas no intervalo entre 300 e 400 km/h, onde esta razão tem tendência a ser igual para os diferentes comboios e cerca de 6 a 7 vezes superior às velocidades verticais obtidas aos 50 km/h. À semelhança dos factores de amplificação dinâmica dos deslocamentos, a razão entre as velocidades, também é superior para o caso das velocidades positivas. Por outro lado, a razão entre as acelerações negativas é duas vezes superior às positivas.

Uma particularidade das acelerações é que estas tendem a aumentar para elevadas velocidades de circulação ao contrário dos deslocamentos e das velocidades que tem tendência a diminuir. No caso dos deslocamentos negativos e para elevadas velocidades de circulação (≥ 275 km/h), essa aproximação tende para uma amplificação próxima de 1, obtendo-se deslocamentos próximos aos obtidos a 50 km/h

As respostas anteriores foram obtidas, considerando a interação tendo em conta o ponto médio da via. No entanto é possível obter uma solução mais próxima da realidade, admitindo uma interação tendo em conta o deslocamento. Esta condição significa obter funções de transferência diferentes, onde porventura o pico da curva irá corresponder a um número de onda diferente. É possível comparar, através das Figura 67a) e Figura 67b), as funções de transferência do deslocamento, onde se considera a interação tendo em conta o ponto médio e o deslocamento médio, respectivamente. Neste caso, é possível observar que o pico da função é inferior para o caso do deslocamento médio, excitando um número de onda ligeiramente superior.



a)



b)

Figura 67 – Função de transferência na via para uma velocidade de 202 km/h: a) Interação tendo em conta o ponto médio; b) Interação tendo em conta o deslocamento médio

Ao escalar estas funções com as funções de carga dos comboios obtêm-se respostas distintas, uma vez que as funções de carga são as mesmas e as funções de transferência são diferentes, com picos a corresponder a números de ondas distintos. Seguidamente, são expostas as funções de carga dos

comboios Eurostar (Figura 68) e Thalys (Figura 69), de modo a ser possível observar esta situação. As funções de carga destes comboios são muito semelhantes uma vez que a configuração geométrica e de carregamento são idênticas para estes dois comboios. Apesar desta semelhança, é possível constatar que para iguais números de onda, os resultados obtidos para cada comboio são bastante diferentes. O comboio Thalys apresenta resultados consideravelmente superiores aos do Eurostar, exibindo para o caso do deslocamento médio um valor que corresponde curiosamente a um pico da própria função de carga. Foram efectuadas análises deste tipo para os restantes comboios, onde no entanto os resultados não eram tão expressivos como no caso particular destes dois comboios.

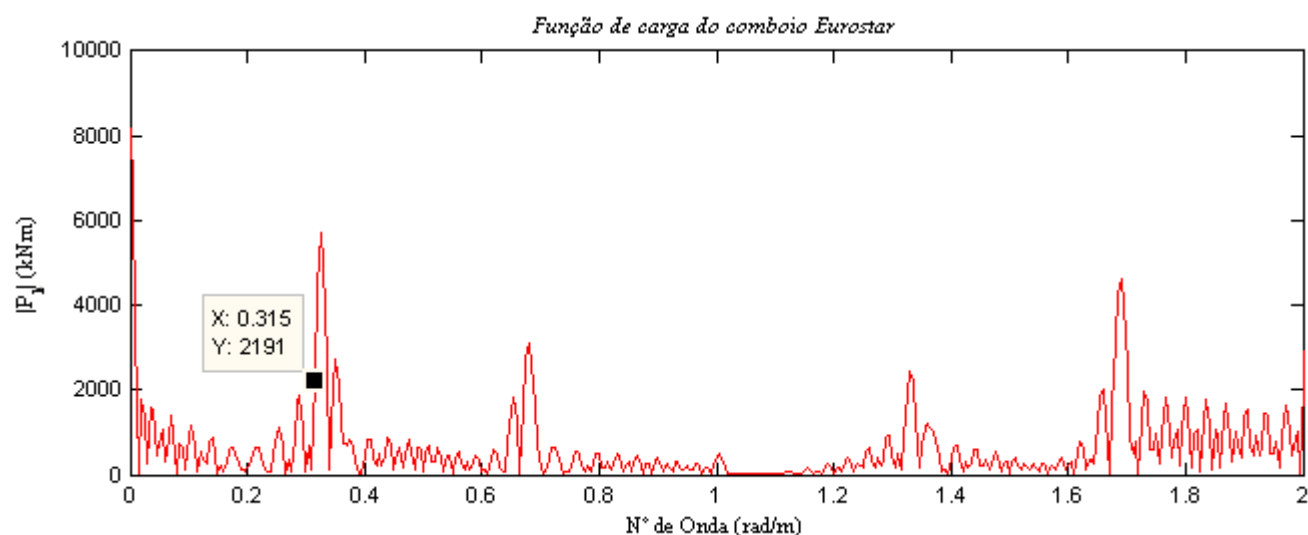
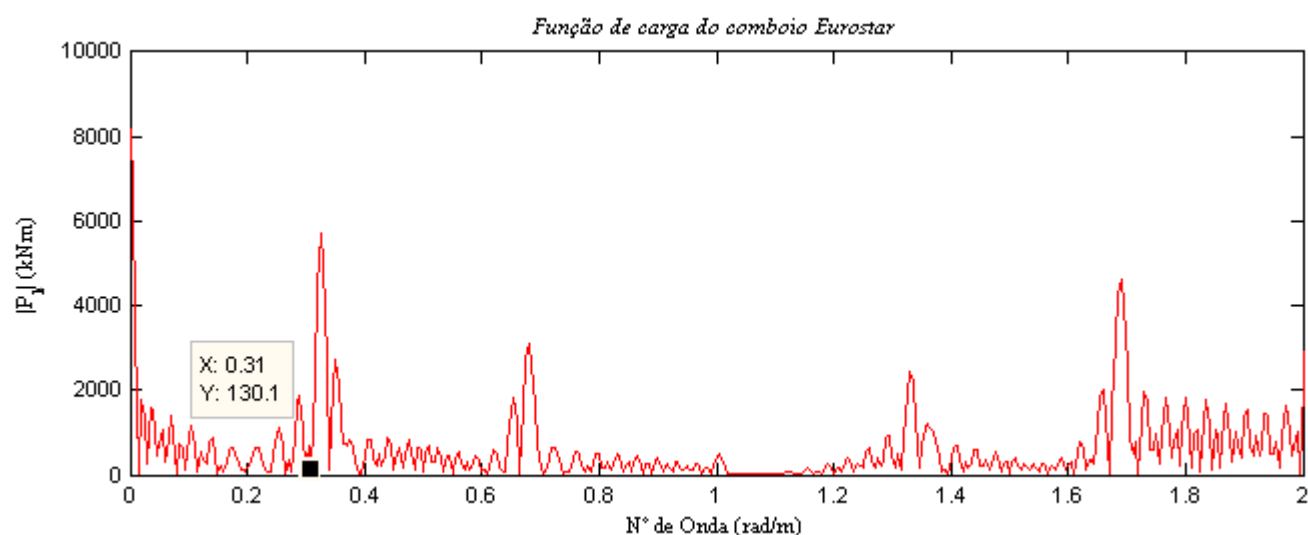


Figura 68 – Comparação dos valores do espectro de função de carga do comboio Eurostar, correspondentes às funções de transferência com: a) Interação no ponto médio; b) Interação no deslocamento médio

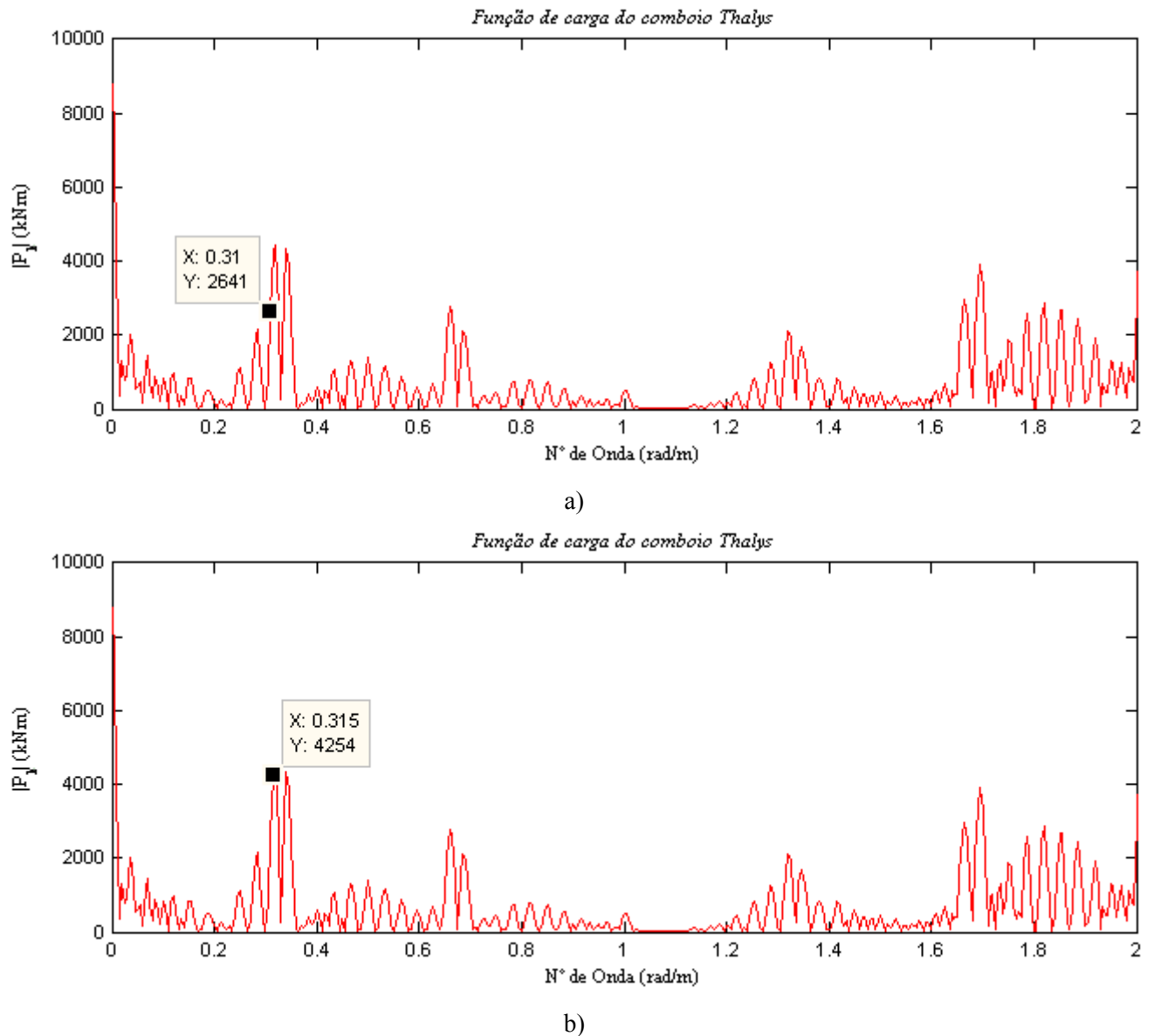
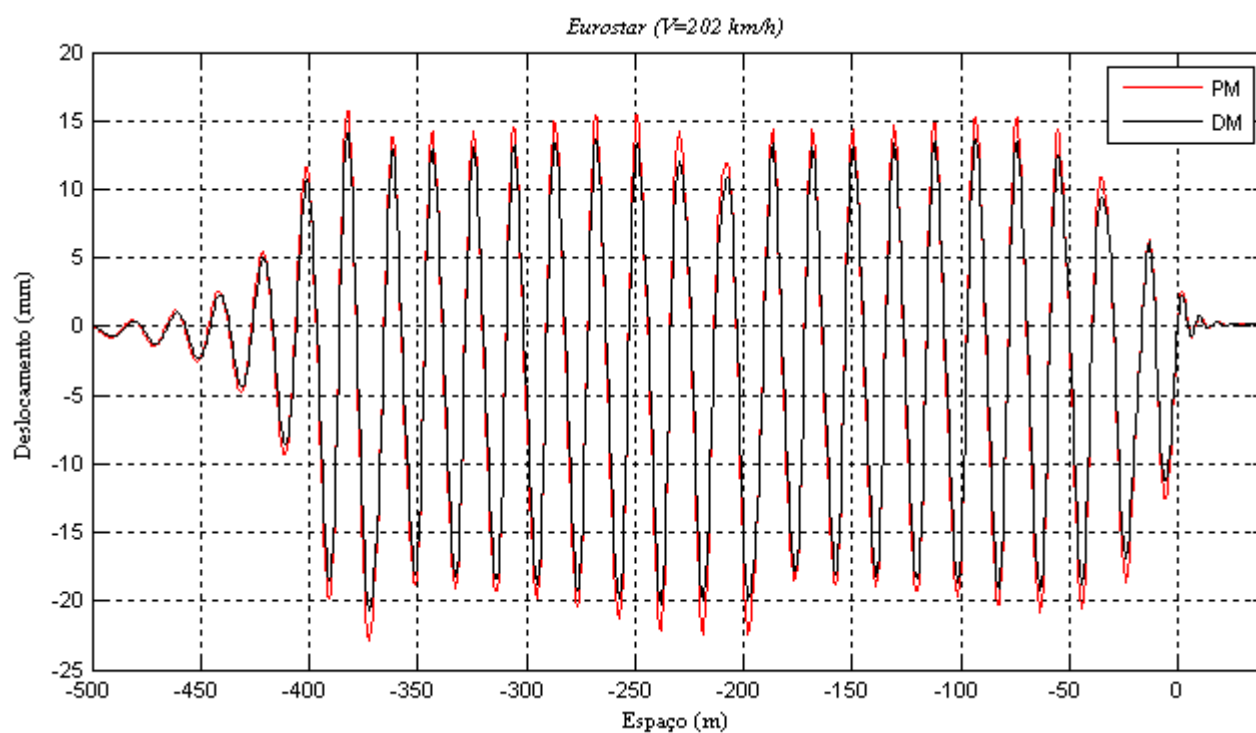
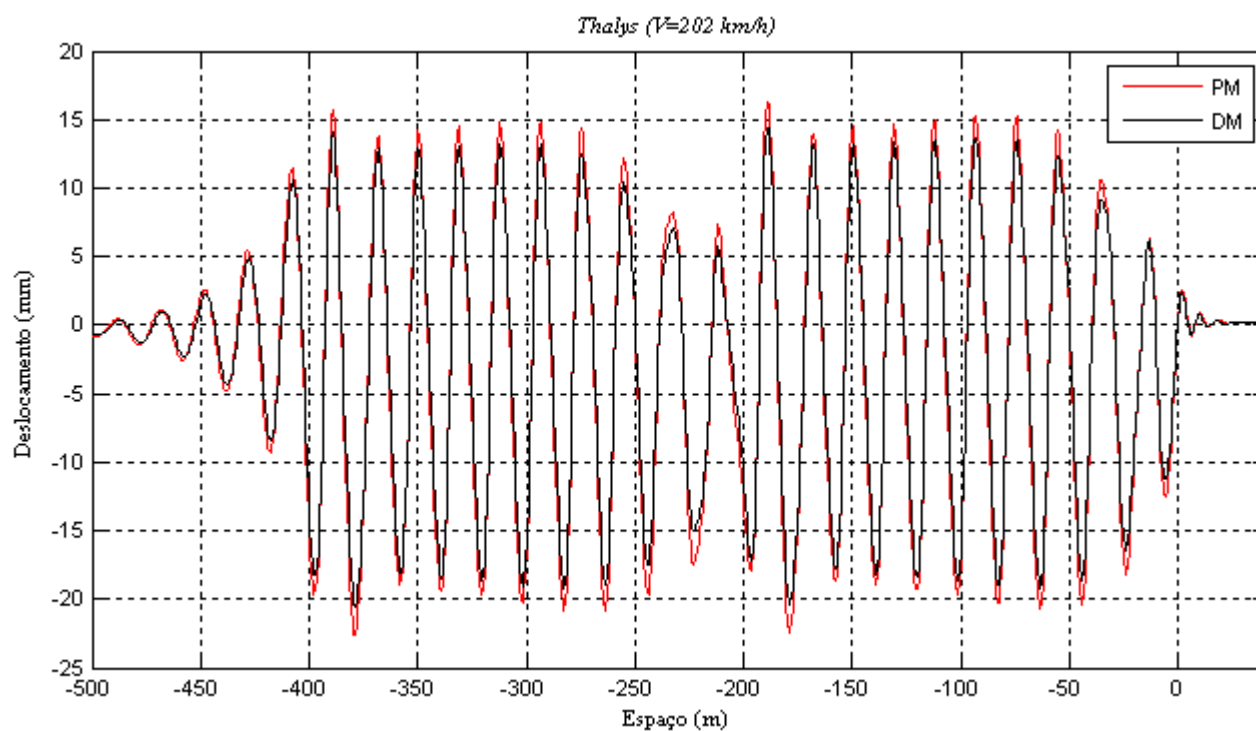


Figura 69 – Comparação dos valores do espectro de função de carga do comboio Thalys, correspondentes às funções de transferência com: a) Interação no ponto médio; b) Interação no deslocamento médio

Para interpretar esta informação é necessário transpor os resultados do domínio da frequência para o domínio do tempo, como nos casos anteriores. A Figura 70 apresenta os deslocamentos obtidos, para os comboios Eurostar e Thalys a circular a 202 km/h, segundo os dois esquemas de interação.



a)



b)

Figura 70 – Comparação dos deslocamentos verticais ao longo da via com interação tendo em conta o ponto (PM) e o deslocamento médio (DM): a) Eurostar à velocidade de 202 km/h; b) Thalys à velocidade de 202 km

Ao determinar os deslocamentos segundo os diferentes esquemas de interacção, foi possível constatar que ao adoptar a interacção ao nível do deslocamento médio existe uma diminuição considerável. Em termos médios verifica-se uma redução de cerca de 8 a 9 %. A 225 km/h regista-se uma diminuição dos assentamentos de 13,98, 13,91, 13,18 e 13,00% para os comboios ICE, ETR, X2000 e Virgin, respectivamente. A menor redução foi observada para o comboio Talgo a circular a 175 km/h, sendo essa diminuição aproximadamente 4,16 %.

4.6 EFEITOS DINÂMICOS NA VIZINHANÇA DA VIA

O conhecimento do comportamento dinâmico na vizinhança da via é imprescindível. Este assunto é de extrema importância, uma vez que os efeitos produzidos pela passagem de um comboio de AV pode causar danos nas imediações das vias e desconforto dos residentes. Para evitar estes inconvenientes é necessário avaliar os acontecimentos prováveis de ocorrer quando uma via deste género for submetida à passagem deste tipo de comboios. O estudo destes efeitos poderá ser útil ao prevenir prejuízos secundários e desconforto das pessoas que vivem nessas áreas. Uma análise deste género permite fornecer aos engenheiros, e restantes agentes do sector, informações que permitam determinar as soluções técnicas apropriadas para cada situação.

Neste caso particular de Ledsgard, optou-se por estudar o comportamento dinâmico do terreno a diferentes distâncias da via. Para tal efectuou-se observações dos deslocamentos, velocidades e acelerações até uma distância a partir da qual a variação já não era significativa. Os quatro afastamentos pontuais considerados foram 0, 5, 15 e 30 m, respectivamente. Os afastamentos à via traduzem-se através de uma alteração da função de transferência, como se pode ver na Figura 71.

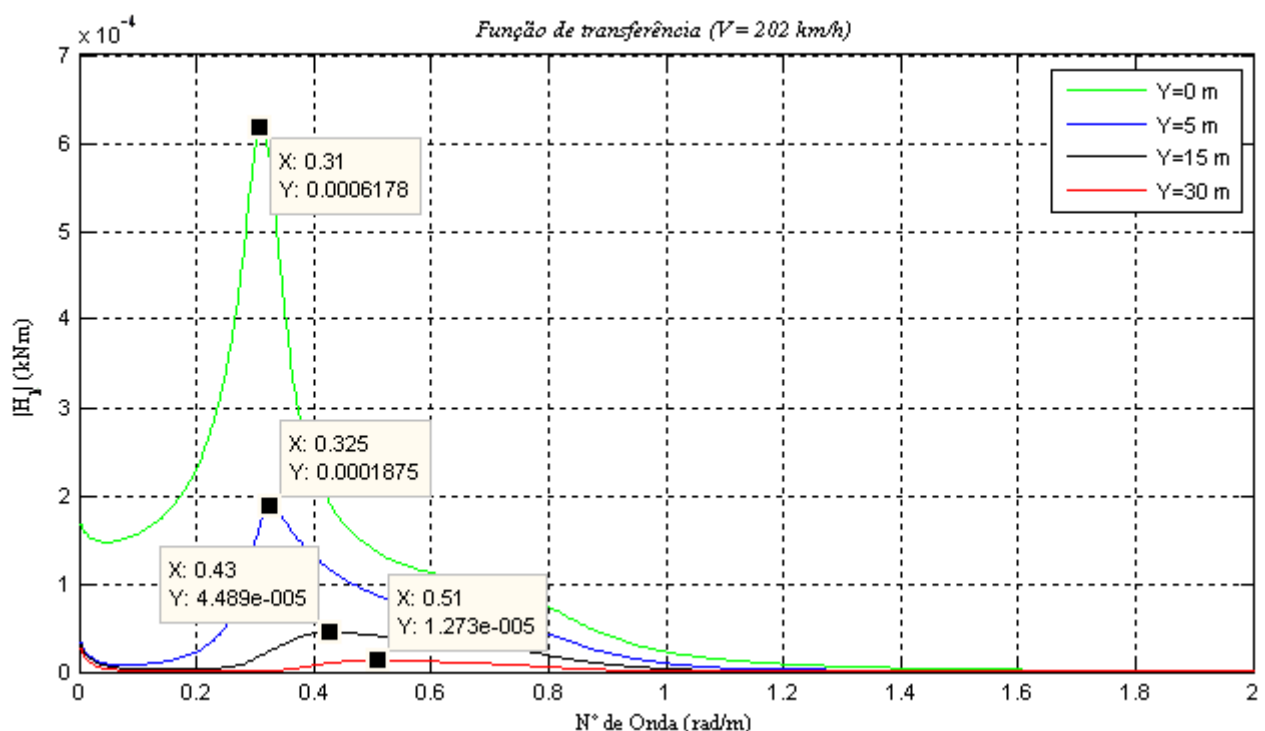


Figura 71 – Funções de transferência para diferentes afastamentos da via para uma velocidade de circulação de 202 km/h

Ao escalar estas funções de transferências com as funções de carga dos comboios obtém-se as respostas no domínio da frequência, que depois são transformadas para o domínio do tempo. Os resultados finais são condicionados pelas funções de transferência, uma vez que as funções de carga são as mesmas que aquelas que foram adoptadas no estudo do comportamento dinâmico ao longo da via. A Figura 72 ilustra claramente a atenuação dos deslocamentos verticais com o aumento da distância perpendicular ao eixo longitudinal da via. Ao observar essa mesma figura constata-se que existe uma redução significativa dos deslocamentos verticais numa distância muito próxima. A 5 m da via já se verifica uma redução da variação dos deslocamentos máximos de 63,70 % e 53,99 % para os comboios X2000 e ICE, respectivamente. A esta velocidade (202 km/h) verificou-se para os restantes comboios uma atenuação dos deslocamentos também desta ordem de grandeza, com percentagens no intervalo entre 49,46 % e 66,97 % para o comboio Talgo e Eurostar, respectivamente. Em termos médios, esta diminuição é da ordem dos 65,0 %, o que ainda é uma redução considerável. A partir dos 30 m, os deslocamentos verticais já correspondem praticamente a valores residuais, onde a atenuação relativamente aos deslocamentos iniciais já é da ordem dos 96,0%. No Quadro 10 apresentam-se os deslocamentos obtidos na vizinhança da via quando esta é submetida à passagem dos diferentes comboios a uma velocidade de 202 km/h.

Quadro 10 – Deslocamentos verticais na vizinhança da via, para uma velocidade de circulação de 202 km/h

Comboio	Y= 0 m		Y= 5 m		Y= 15 m		Y= 30 m	
	δ^+ (mm)	δ^- (mm)	δ^+ (mm)	δ^- (mm)	δ^+ (mm)	δ^- (mm)	δ^+ (mm)	δ^- (mm)
X2000	9,434	-13,500	4,318	-4,006	0,833	-1,760	2,206	-0,653
ETR	6,448	-14,970	4,458	-5,186	1,284	-1,885	0,080	-0,778
Eurostar	15,72	-22,890	4,854	-7,898	0,894	-1,748	0,006	-0,745
ICE	6,078	-15,710	4,451	-5,574	1,449	-2,070	0,1354	-0,823
Talgo	3,726	-14,470	3,812	-5,385	1,281	-2,633	0,211	-1,162
TGV	16,280	-22,590	4,802	-8,075	0,905	-2,524	0,009	-1,021
Thalys	16,250	-22,630	4,841	-8,144	0,924	-2,519	0,004	-1,007
Virgin	12,420	-19,160	4,416	-5,533	0,474	-2,098	0,082	-0,886

As velocidades e acelerações também diminuem significativamente com o aumento da distância ao eixo da via. Na Figura 73 e Figura 74 é possível observar a evolução das respostas destes parâmetros para o caso do comboio X2000 sendo os valores máximos e mínimos apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Velocidades acelerações verticais máximas e mínimas na vizinhança da via à passagem do comboio X2000 a uma velocidade de 202 km/h

Distância à via	v^+_{\max} (mm/s)	v^-_{\min} (mm/s)	a^+_{\max} (mm/s ²)	a^-_{\min} (mm/s ²)
Y= 0 m	244,60	-233,50	6882	-6558
Y= 5 m	107,80	-101,70	3408	-3657
Y= 15 m	43,69	-38,40	1467	-1473
Y = 30 m	11,58	-12,36	480	-449

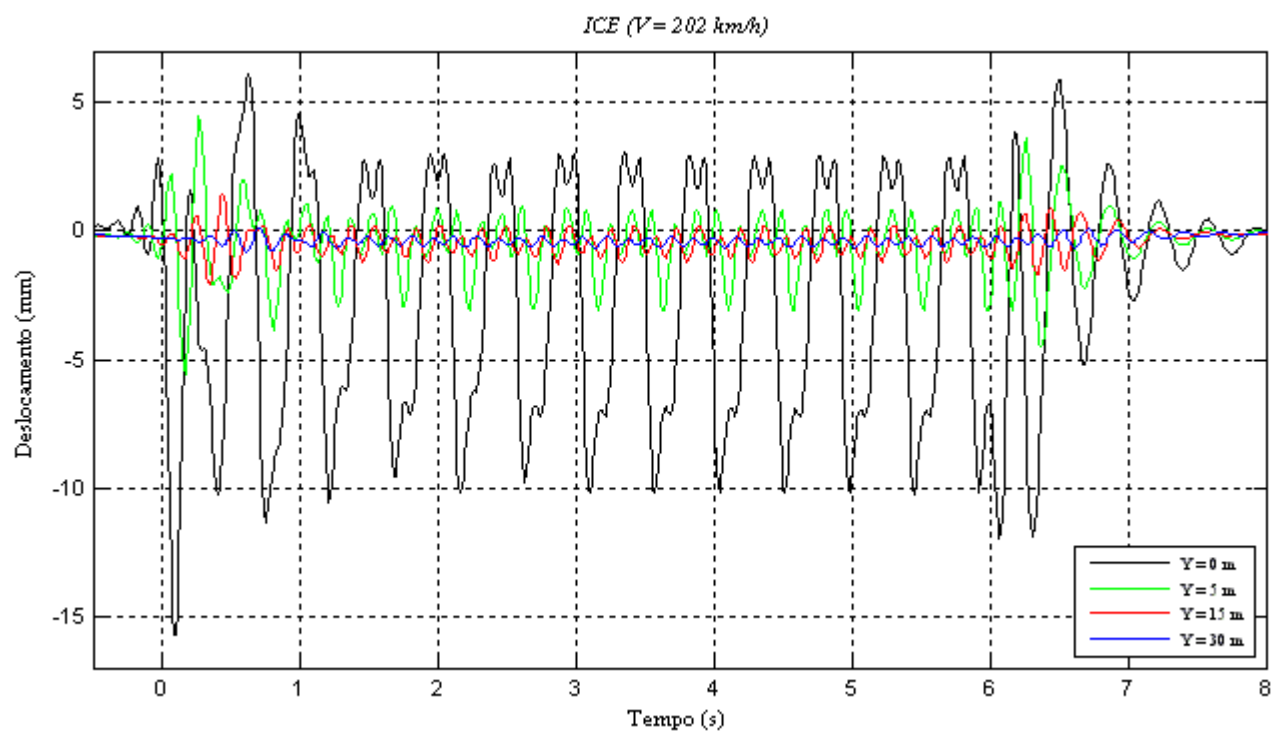
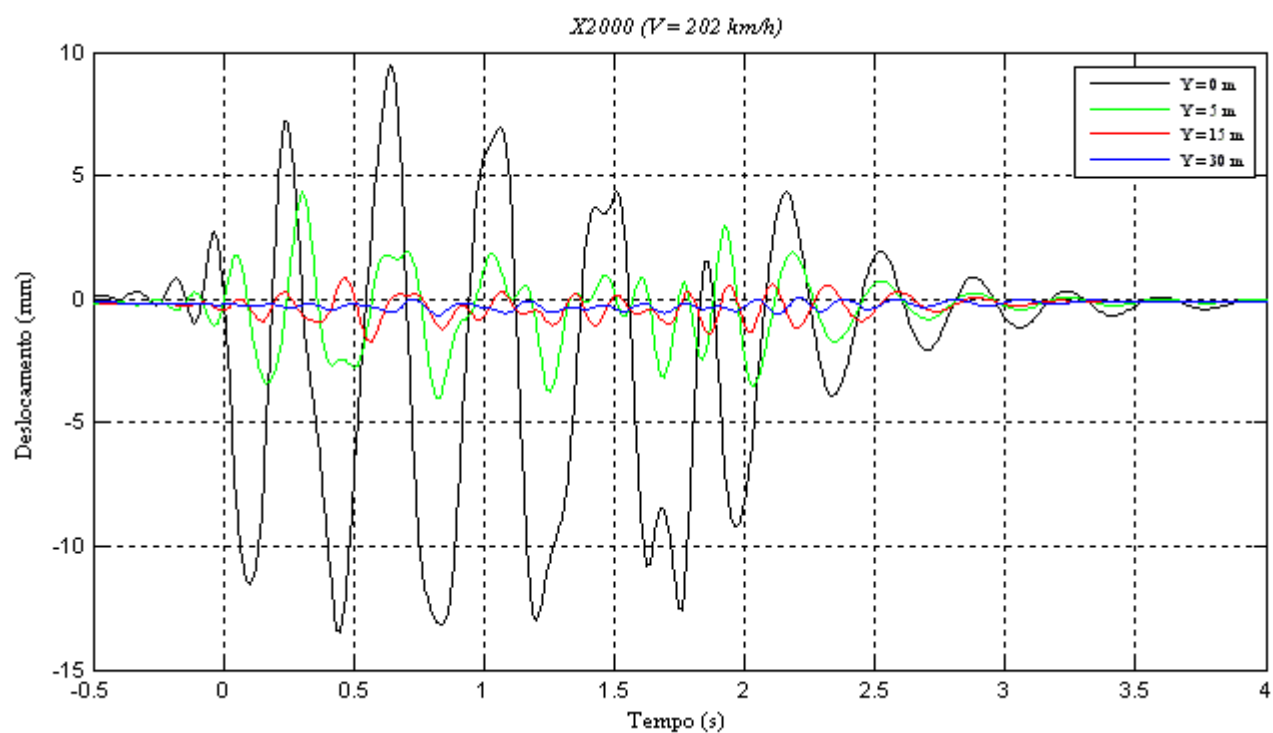


Figura 72 – História temporal do deslocamento vertical do terreno, à velocidade de 202 km/h, para diferentes afastamentos ao eixo da via: a) X2000; b) ICE

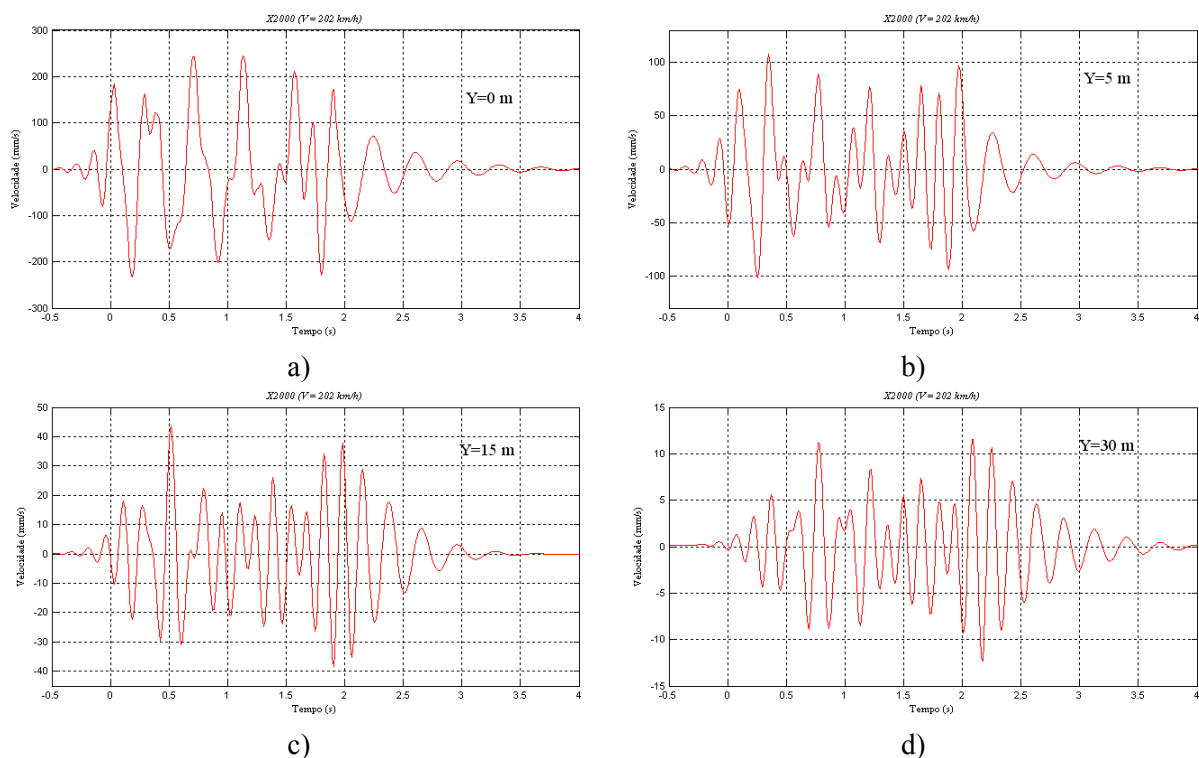


Figura 73 – Comparação das velocidades verticais do terreno, na vizinhança da via, à passagem do comboio X2000 à velocidade de 202 km/h: a) Y= 0 m; Y= 5 m; c) Y= 15 m; d) Y= 30 m

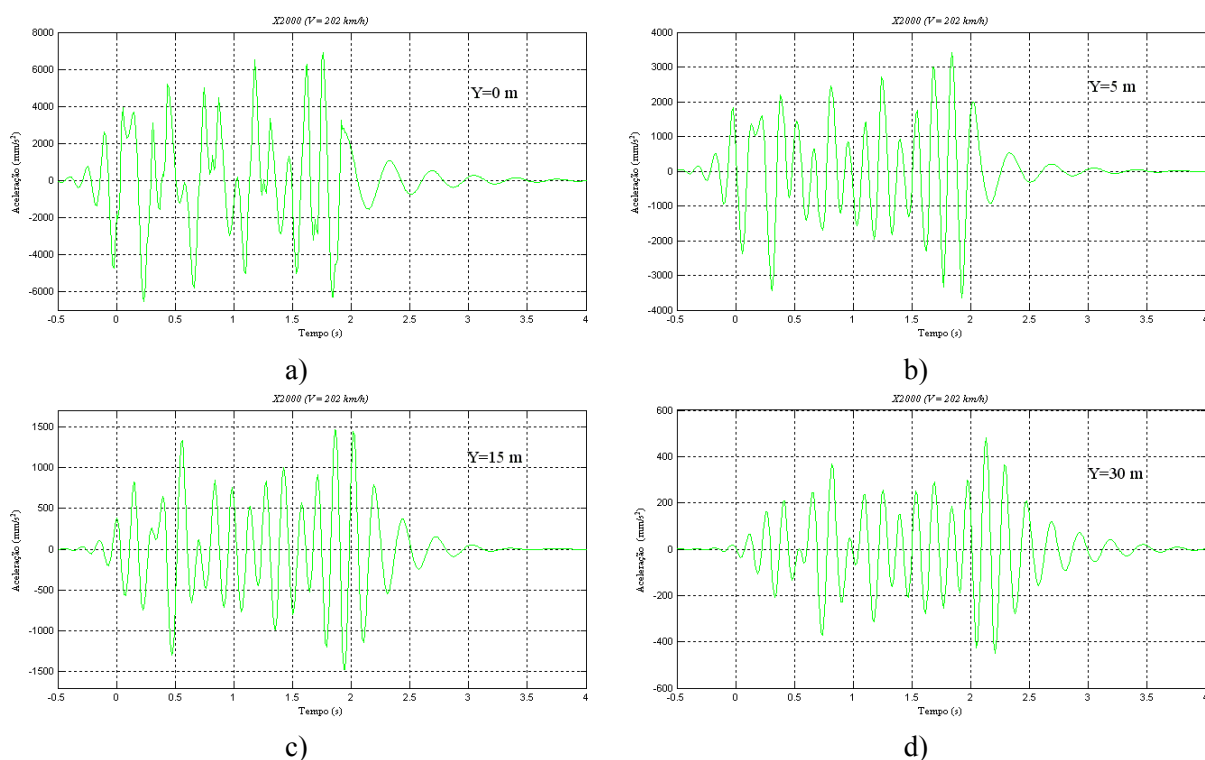


Figura 74 – Comparação das acelerações verticais do terreno, na vizinhança da via, à passagem do comboio X2000 à velocidade de 202 km/h: a) Y= 0 m; Y= 5 m; c) Y= 15 m; d) Y= 30 m

Foram elaborados gráficos em 3D, de modo a ter uma melhor percepção acerca dos deslocamentos verticais na vizinhança da via. A Figura 75 ilustra um desses gráficos, apresentando os deslocamentos, para o caso do comboio X2000, a circular a 202 km/h. Através destas vistas em 3D é possível ter uma noção de como se desenvolve a frente da onda e como esta se propaga no plano perpendicular à via. Estas representações, segundo outros planos de observação, permitem-nos identificar claramente o cone de Mach. Para avaliar este fenómeno realizaram-se várias corridas, para diferentes comboios, com velocidades a aumentar de 150 até 250 km/h. As Figura 76 e Figura 77 facultam-nos uma visão da evolução do cone de Mach, com o aumento da velocidade, para o caso dos comboios X2000 e Virgin, respectivamente. É possível visualizar nas figuras a diminuição do ângulo do cone com o aumento da velocidade de circulação dos comboios.

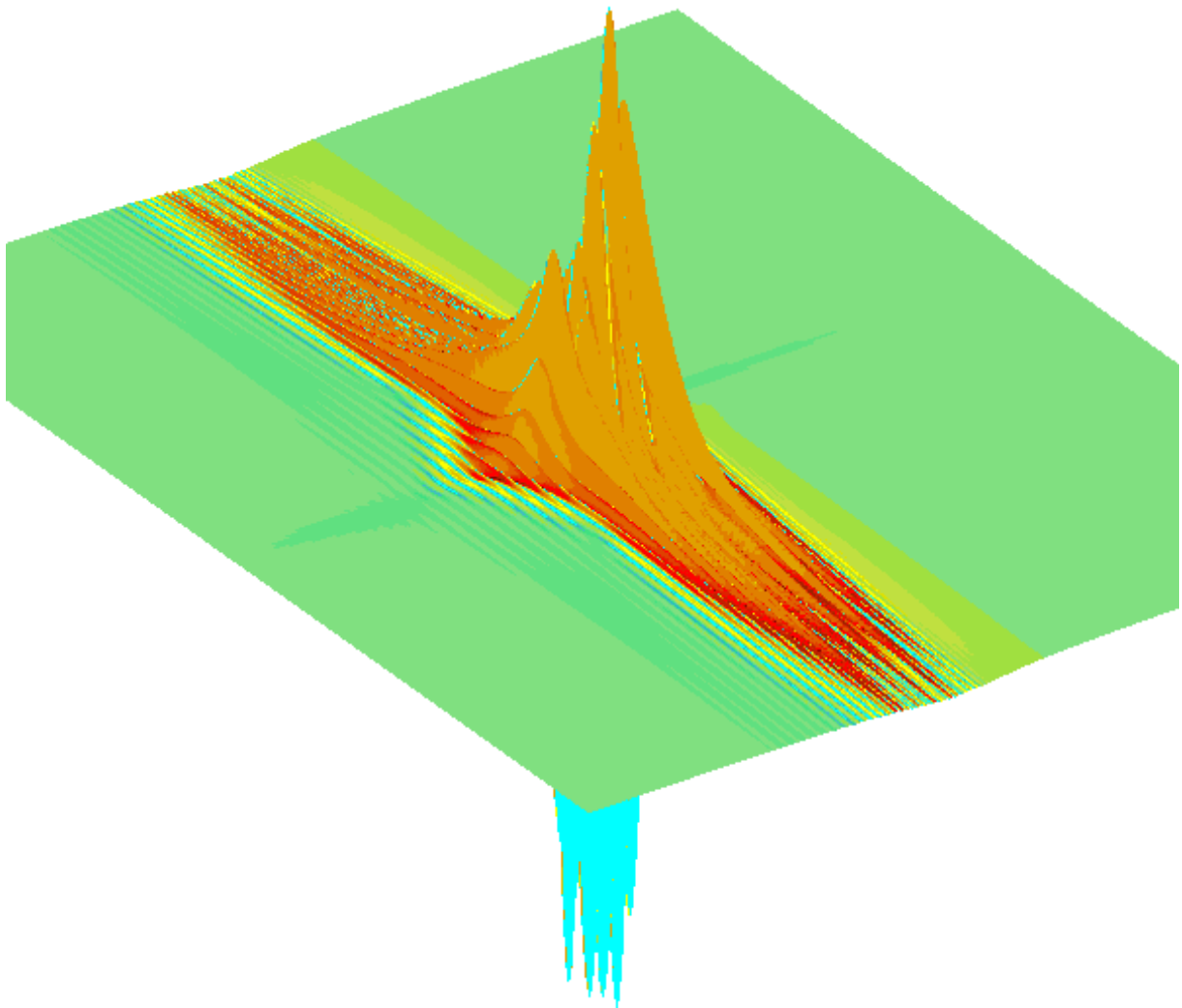


Figura 75 – Vista em 3D dos deslocamentos verticais na vizinhança da via, quando submetida à passagem do comboio X2000 a uma velocidade de 202 km/h

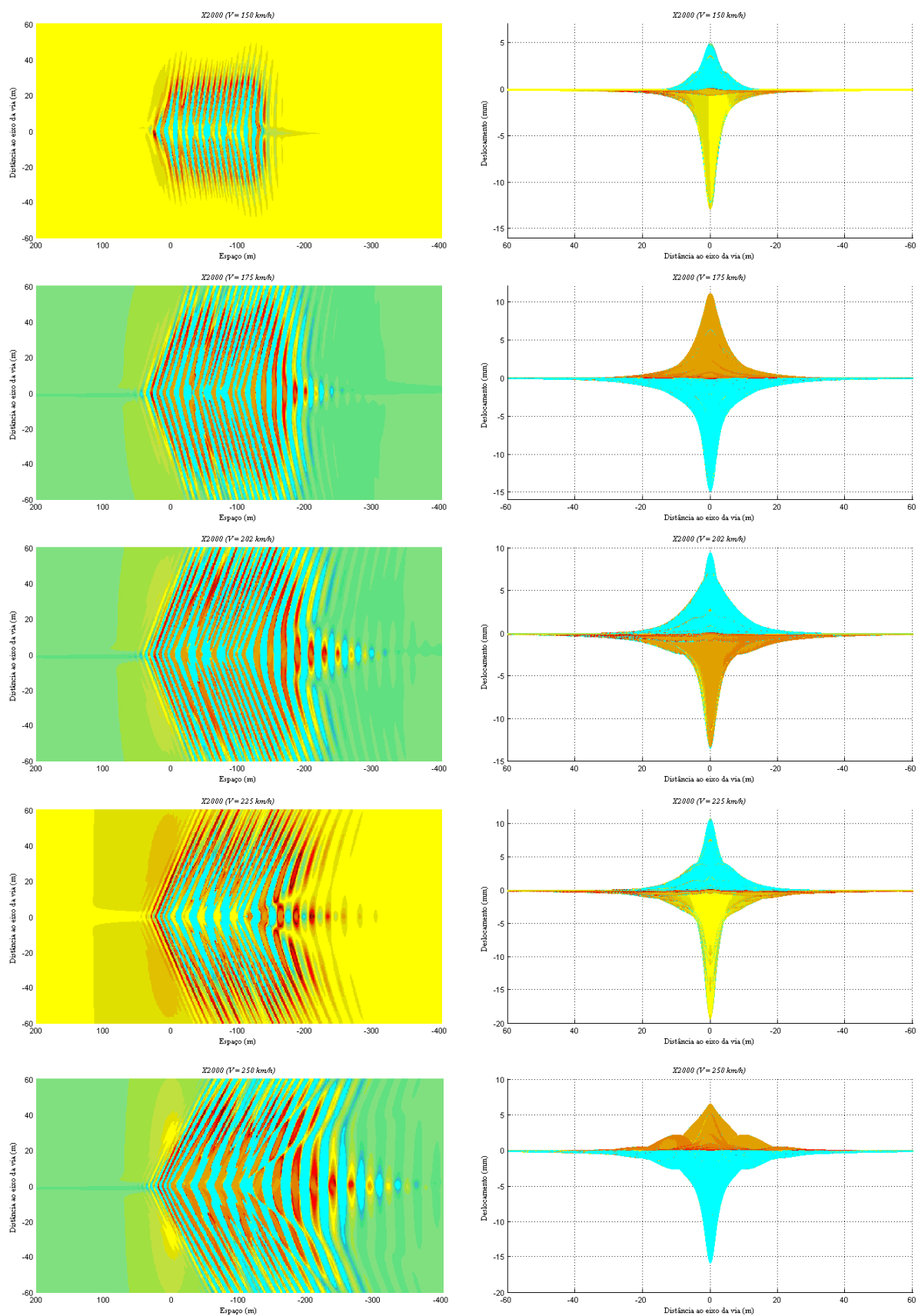


Figura 76 – Evolução do cone de mach com o aumento da velocidade à passagem do comboio X2000

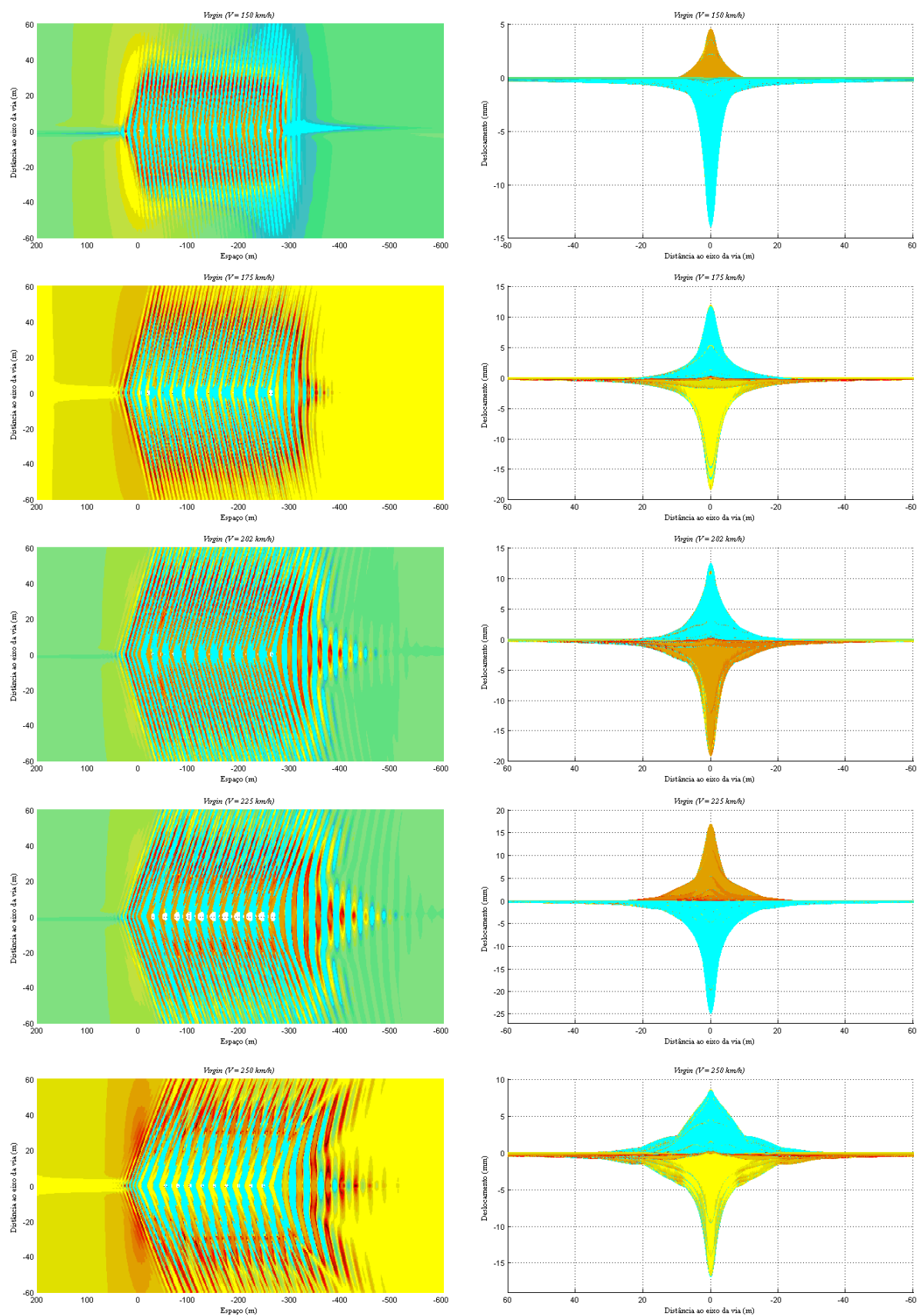


Figura 77 – Evolução do cone de mach com o aumento da velocidade à passagem do comboio Virgin

4.7 ESTUDO PARAMÉTRICO

4.7.1 ALTERAÇÕES DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Este primeiro estudo paramétrico consistiu em efectuar alterações nas condições de fronteira. Efectuou-se um exercício experimental para averiguar como seria o comportamento dinâmico, no caso do semi-espaço ser deslocado da cota $z = -14,60$ m para a cota $z = -8,60$ m (Figura 79).

Para este ensaio foram adoptados os parâmetros correspondentes ao domínio das grandes deformações como se pode observar na Figura 78.

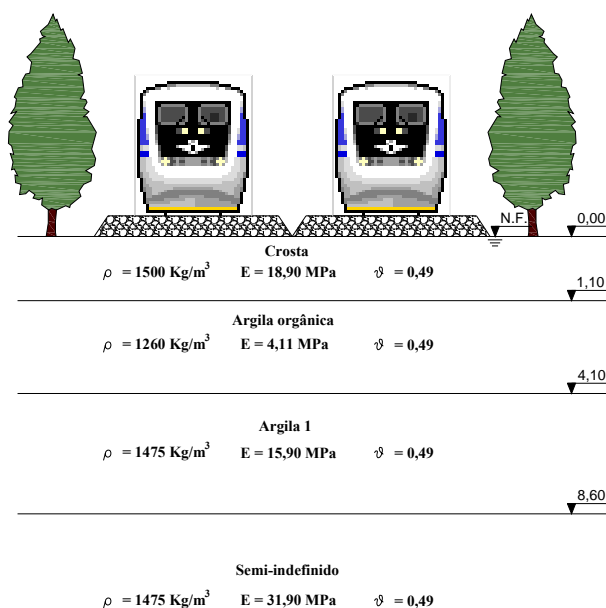


Figura 78 – Propriedades do maciço no domínio das grandes deformações com semi-indefinido à cota $z = -8,60$ m

Os resultados para os diferentes comboios, não apresentavam uma variação expressiva, pelo contrário, quase que existia uma sobreposição das respostas dinâmicas com as obtidas para o semi-indefinido à cota $z = -14,60$ m. Esta informação pode ser útil para reduzir as profundidades de discretização dos maciços e consequentemente diminuir os tempos de computação.

O semi-espaço indefinido (halfspace), como o próprio nome o indica, admite um modelo, em que o espaço a analisar não é definido na totalidade. O modelo considera que o último estrato do maciço se prolonga até ao infinito. Do ponto de vista teórico, isto pressupõe que não existe uma fronteira rígida em profundidade, que limite o domínio da propagação das vibrações. Estruturalmente, pode-se afirmar, que qualquer ponto a uma determinada profundidade tem liberdade de movimento, em todas as direcções.

Efectuou-se algumas simulações, supondo que o maciço, se encontrava fundado sobre um estrato infinitamente rígido (Bedrock), à profundidade de 14,60 m. Numericamente, implica considerar, que àquela profundidade, vai existir um ponto com movimento impedido nas várias direcções.

Na Figura 80 é possível observar o que sucede, quando esta condição é aplicada.

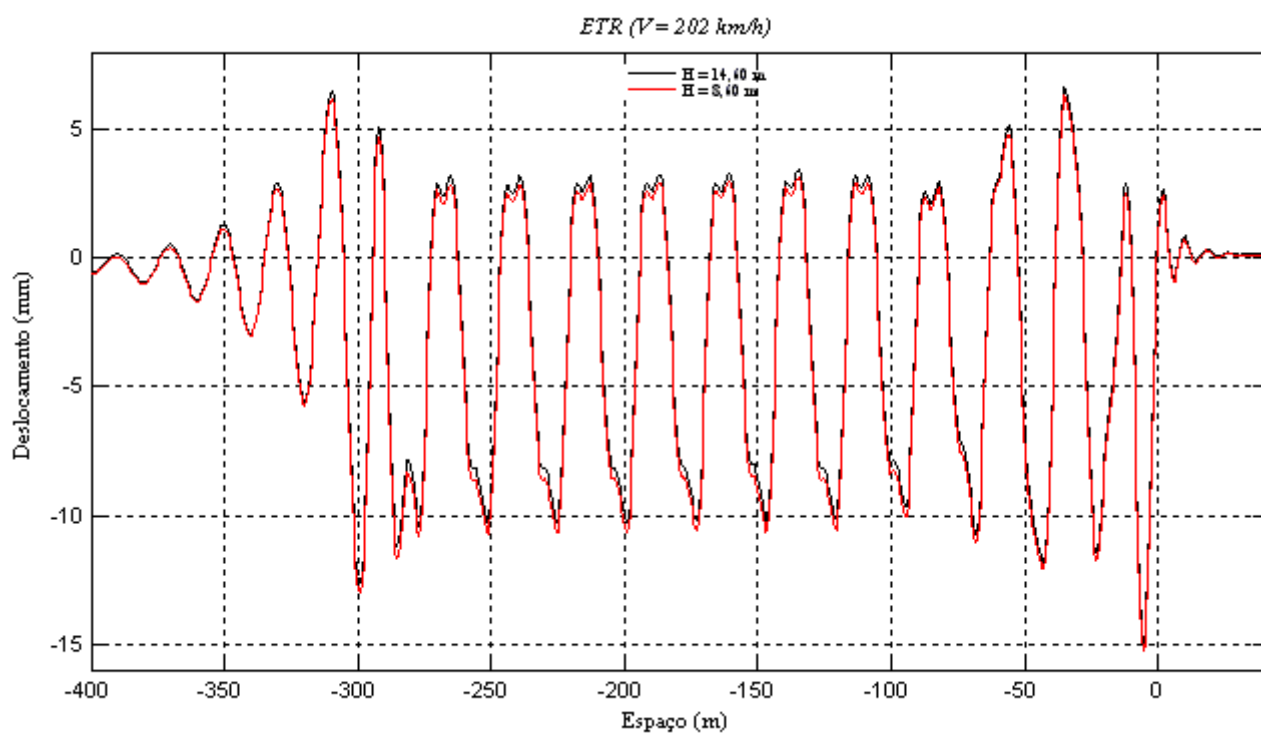


Figura 79 – Deslocamentos verticais ao longo da via à passagem do comboio ETR para semi-indefinidos com inícios em $z = -8,60\text{m}$ e $z = -14,60\text{m}$

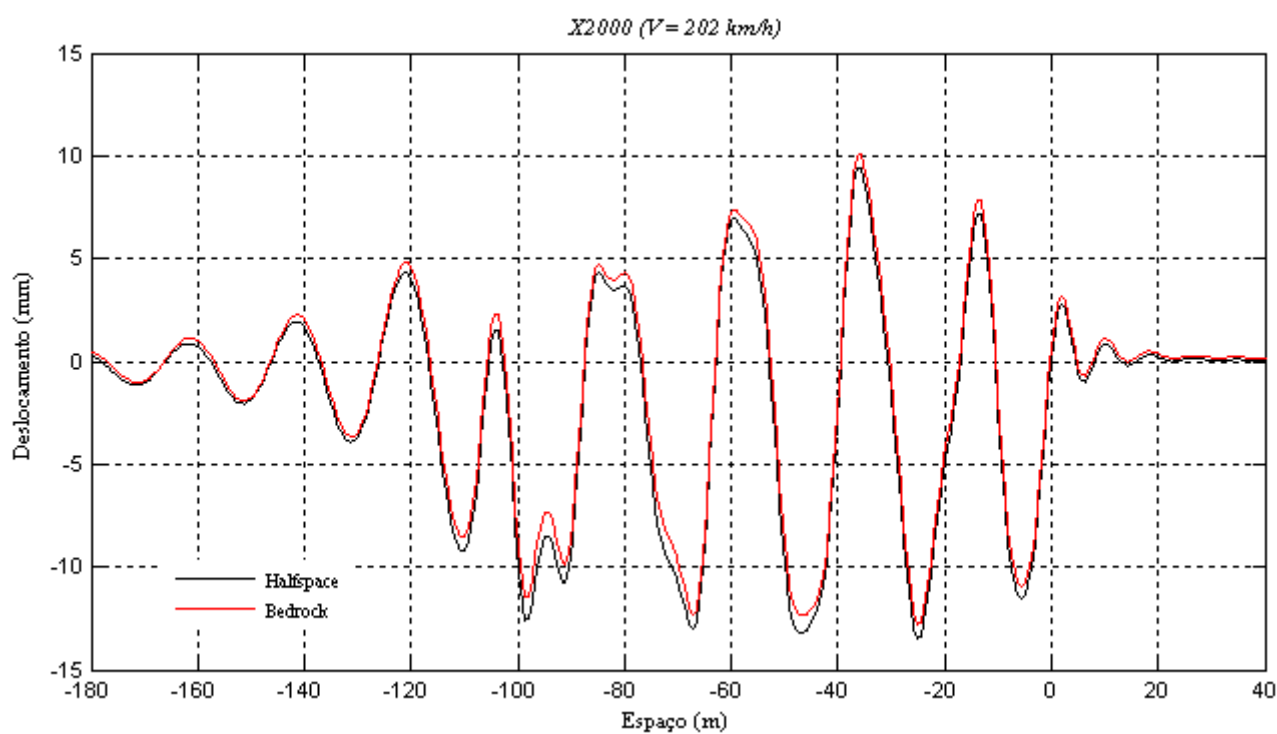


Figura 80 – Deslocamentos verticais ao longo da via, com diferentes condições de apoio, submetida à passagem do comboio X2000, a uma velocidade de 70 km/h

Observando a Figura 80, verifica-se que quando existe um estrato rígido a definir o domínio, os assentamentos são menores mas em contrapartida existe empolamentos superiores. A interpretação da resposta é de fácil entendimento. As vibrações transmitidas ao terreno, não se vão degradar até a uma profundidade infinita, sendo portanto reflectidas mais rapidamente, que no caso do semi-espaço. Uma vez que os estratos atravessados são iguais para ambos os casos, as vibrações também são iguais, daí a razão de ocorrer empolamentos superiores para o caso da fundação rígida.

4.7.2 REMOÇÃO DO ESTRATO DE ARGILA ORGÂNICA

Neste segundo estudo paramétrico optou-se por remover o estrato de argila orgânica e considerar que a camada subjacente (Argila 1) se prolonga até à crosta, ou seja, entre $z = -1,10$ m e $z = -4,10$ m existe o mesmo tipo de solo do que o que se encontra presente entre a cota $z = -4,10$ m e $z = -8,60$ m. Na Figura 81 é possível identificar as propriedades do maciço com a alteração introduzida.

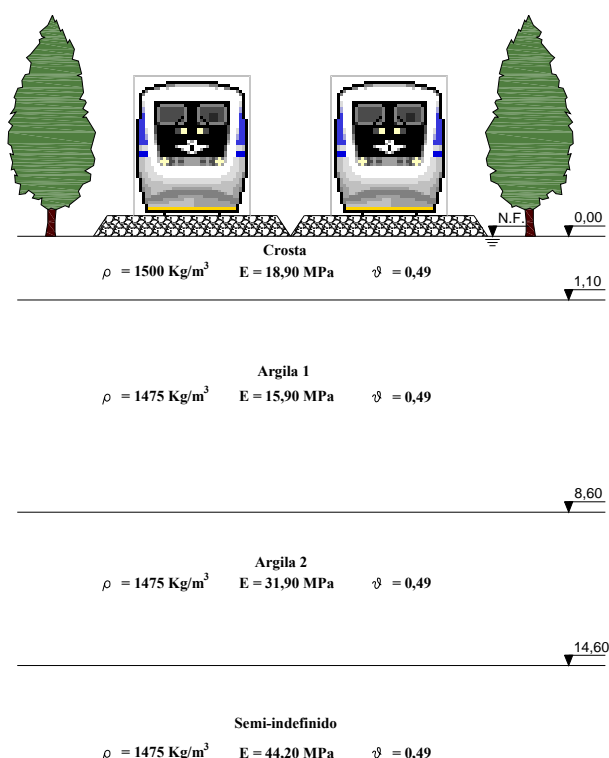


Figura 81 – Propriedades do maciço substituindo argila orgânica por solo do mesmo tipo da argila 1

Para este maciço foi efectuada uma análise análoga ao modelo inicial, avaliando deslocamentos, velocidades e acelerações, mas somente ao longo da via. Estes parâmetros foram observados para diferentes velocidades de circulação, de modo a ser possível efectuar uma análise comparativa com os resultados obtidos para o maciço original.

O Quadro 12 e o Quadro 13 apresentam os valores obtidos dos diferentes parâmetros, para o maciço com e sem a argila orgânica, respectivamente, quando submetidos à passagem de comboios a uma velocidade de 50 km/h. Estes dados permitem determinar, através dos factores de amplificação, das razões das velocidades e das razões das acelerações, os resultados concretos dos deslocamentos, velocidades e acelerações, respectivamente, para diferentes velocidades de circulação. Ao analisar os respectivos quadros, percebe-se que este maciço, sem o estrato de argila mole, apresenta para aquela

velocidade de circulação, resultados bem mais favoráveis. Além dos resultados serem obtidos a partir de um movimento com componente essencialmente estática, ainda assim se verificam alterações consideráveis dos diferentes parâmetros. No entanto é fundamental efectuar uma avaliação para velocidades superiores de modo a verificar o que acontece quando existe o efeito produzido pela componente dinâmica.

Quadro 12 – Deslocamentos, velocidades e acelerações ao longo da via, para o maciço sem alteração nenhuma e submetido à passagem de comboios de AV a uma velocidade de 50 km/h

Comboio	Deslocamentos (mm)		Velocidades (mm/s)		Acelerações (mm/s ²)	
	δ^+_{\max}	δ^-_{\min}	v^+_{\max}	v^-_{\min}	a^+_{\max}	a^-_{\min}
X2000	0,56	-8,16	22,48	-22,72	184,15	-160,23
ETR	0,70	-8,21	25,05	-23,43	208,80	-142,45
ICE	0,73	-8,48	25,99	-23,67	223,55	-156,54
Talgo	0,67	-7,76	23,82	-21,51	223,32	-151,35
TGV	0,70	-8,59	23,21	-22,90	196,32	-147,84
Virgin	0,70	-8,47	24,30	-22,42	200,01	-105,25
Média	0,70	-8,34	24,06	-22,81	204,40	-149,59

Quadro 13 – Deslocamentos, velocidades e acelerações ao longo da via, para o macio sem a camada de argila orgânica e submetido à passagem de comboios de AV a uma velocidade de 50 km/h

Comboio	Deslocamentos (mm)		Velocidades (mm/s)		Acelerações (mm/s ²)	
	δ^+_{\max}	δ^-_{\min}	v^+_{\max}	v^-_{\min}	a^+_{\max}	a^-_{\min}
X2000	0,05	-4,57	12,28	-12,48	134,76	-95,91
ETR	0,09	-4,52	13,87	-12,42	149,76	-76,99
ICE	0,10	-4,68	14,47	-12,80	157,99	-87,20
Talgo	0,10	-4,34	13,36	-11,78	165,52	-85,12
TGV	0,13	-4,69	12,61	-11,85	139,23	-82,24
Virgin	0,10	-4,78	13,27	-12,18	141,12	-91,61
Média	0,10	-4,63	13,32	-12,30	145,44	-86,16

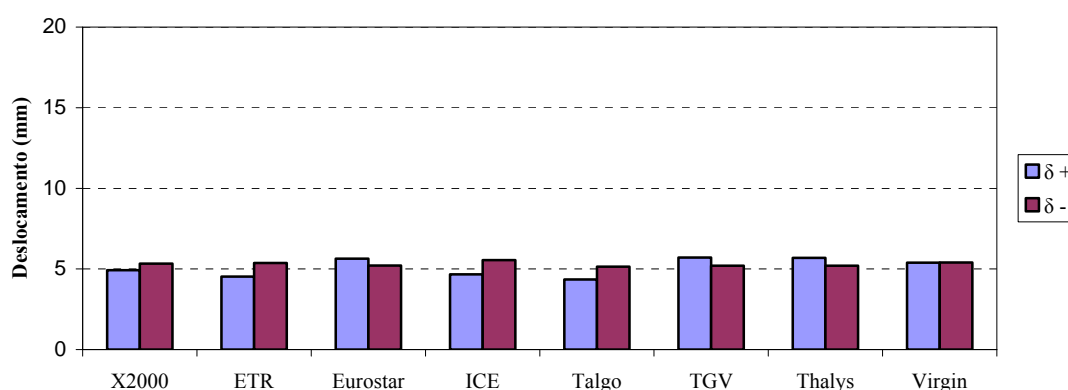
Os deslocamentos, velocidades e acelerações, para a velocidade de circulação de 50 km/h, diminuiriam sensivelmente para metade, à excepção dos deslocamentos positivos, que reduziram para uma sétima parte do valor obtido para o maciço não alterado.

Na figura a) do anexo A.8 é possível identificar uma amplificação dos deslocamentos positivos muito superior no X2000 comparativamente aos restantes comboios. Parte desta situação deriva do facto de o deslocamento a 50 km/h ser bastante inferior aos restantes como se pode ver no Quadro 13. Um exemplo disso é o comboio Virgin, que apesar de exibir uma amplificação menos acentuada que o

X2000, apresenta deslocamento máximo superior. No maciço não alterado, onde a diferença do deslocamento positivo a 50 km/h relativamente aos restantes comboios é menos significativa, tal situação já não acontece.

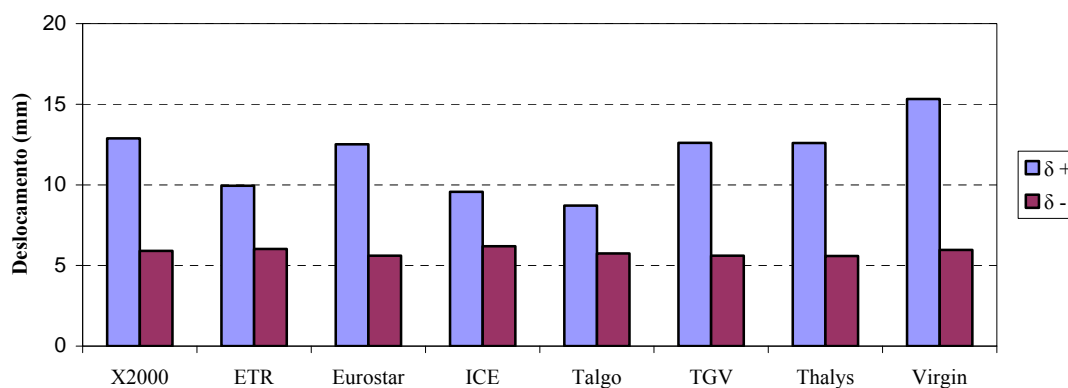
A exceção do X2000 e do Virgin pode-se constatar pela figura a) do anexo A.8, que as curvas seguem uma tendência de amplificação muito próxima, ao contrário do que acontecia no maciço não alterado, onde existia a argila orgânica. No caso dos deslocamentos negativos, a situação é ainda mais clara, uma vez que nem o comboio X2000 nem o Virgin exibem uma discrepância dos deslocamentos a 50 km/h relativamente aos restantes comboios, como acontecia nos deslocamentos positivos. Ao comparar o gráfico de amplificação dos deslocamentos negativos para o maciço não alterado (Figura 64b) com o representado na figura b) do anexo A.8 e associando-os com os deslocamentos apresentados no Quadro 12 e Quadro 13, percebe-se rapidamente que os assentamentos para a situação sem argila são bastante inferiores. Esta redução é cerca de 3 vezes inferior aos deslocamentos obtidos para o maciço não alterado. Para poder visualizar a evolução dos deslocamentos no maciço alterado, com o aumento da velocidade de circulação, é apresentado na Figura 82 diferentes gráficos, que representam os resultados deste parâmetro para velocidades situadas no intervalo entre 150 e 275 km/h.

Remoção do estrato de Argila Orgânica (V = 150 km/h)



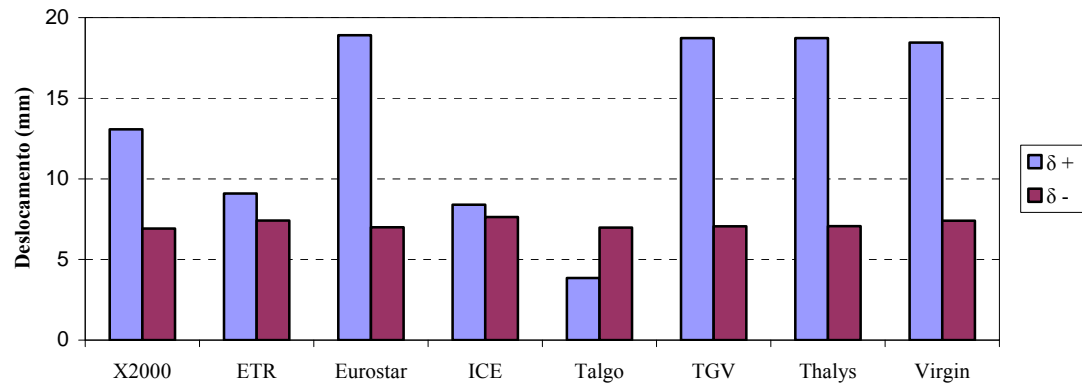
a)

Remoção do estrato de Argila Orgânica (V = 175 km/h)



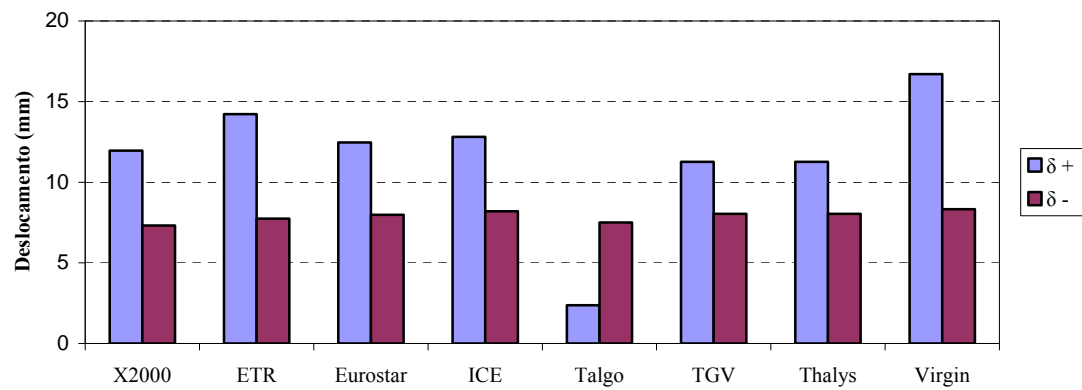
b)

Remoção do estrato de Argila Orgânica (V = 202 km/h)



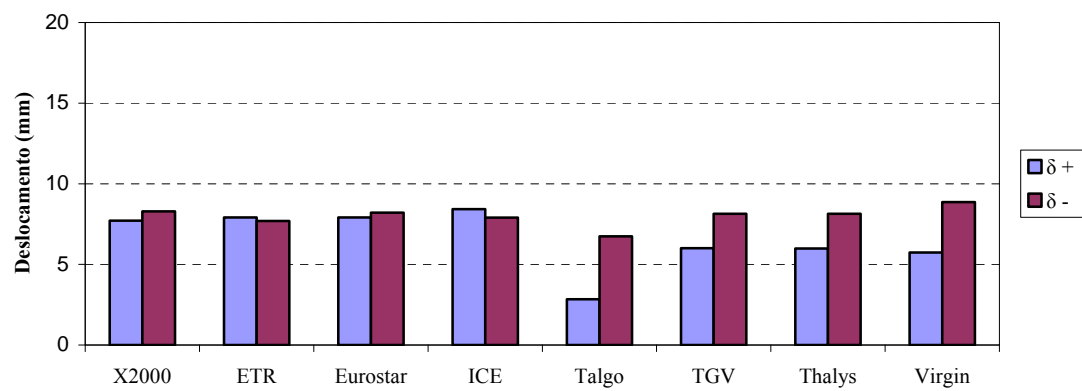
c)

Remoção do estrato de Argila Orgânica (V = 225 km/h)

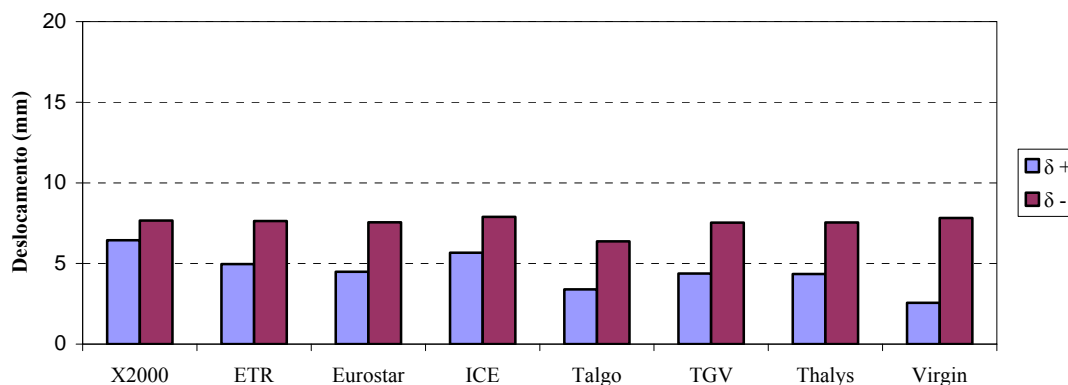


d)

Remoção do estrato de Argila Orgânica (V = 250 km/h)



e)

Remoção do estrato de Argila Orgânica ($V = 275$ km/h)

f)

Figura 82 – Deslocamentos verticais máximos para o maciço alterado à passagem de comboios de AV com velocidade de circulação: a) 150 km/h; b) 175 km/h; c) 202 km/h; d) 225 km/h; e) 250 km/h; f) 275 km/h

A partir dos 175 km/h, já se verificam deslocamentos muito elevados, essencialmente devido à componente dinâmica. Os deslocamentos negativos não são tão afectados pelo o aumento da velocidade como os deslocamentos positivos. O menor deslocamento negativo (5,20 mm) neste intervalo de velocidades é obtido para o TGV a circular a 150 km/h enquanto que o maior (8,87 mm) para o Virgin a 250 km/h. Quanto aos deslocamentos positivos, o deslocamento menor (2,38 mm) é registado pelo o comboio Talgo a circular a 225 km/h enquanto que o maior (18,91 mm) é alcançado pelo TGV a circular a 202 km/h. É de destacar os deslocamentos obtidos pelo comboio Talgo que são geralmente inferiores aos determinados para os restantes comboios. A componente positiva do deslocamento tem tendência a variar expressivamente, com o aumento da velocidade de circulação, em relação aos deslocamentos negativos. É de destacar os comboios Eurostar, TGV, Thalys e Virgin a circular a 202 km/h onde esta variação é bastante evidente.

Relativamente às velocidades (Anexo A.9), verificou-se uma particularidade interessante no gráfico das velocidades positivas. Esta situação prende-se com o facto de a curva não ter tendência a diminuir para velocidades muito elevadas, tal como acontecia no maciço não alterado. As velocidades obtidas para este modelo, sem a argila orgânica, são cerca de metade das obtidas para o modelo com a argila. Além das velocidades determinadas a 50 km/h serem inferiores no maciço não alterado, ainda se verifica uma ligeira diminuição da razão entre velocidades, comparativamente ao maciço não alterado.

No caso das acelerações verticais (Anexo A.10), registou-se um aumento brutal com o aumento da velocidade de circulação, tal como já seria de esperar, agravando-se com o aumento da resistência do maciço uma vez que ao substituir a argila orgânica, está-se a admitir a utilização de um solo com elevada rigidez.

Para este modelo regista-se razões entre acelerações, superiores que as obtidas para o maciço inicialmente proposto.

4.7.3 POSIÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO

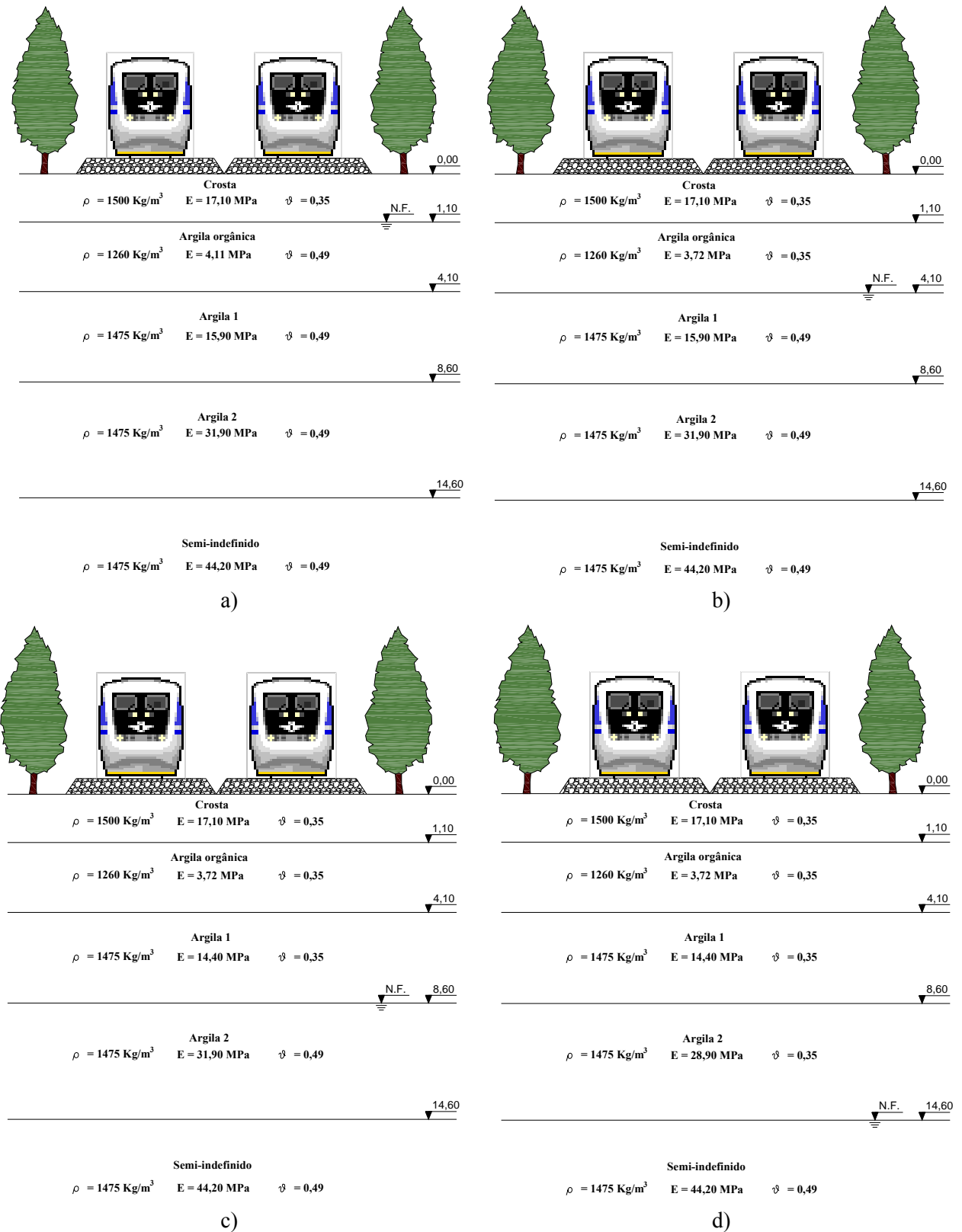


Figura 83 – Propriedades do maciço de Ledsgard quando sujeito ao rebaixamento do Nível Freático para a cota:

a) $z = -1,10 \text{ m}$; b) $z = -4,10 \text{ m}$; c) $z = -8,60 \text{ m}$; d) $z = -14,60 \text{ m}$

O terceiro estudo paramétrico realizado neste trabalho consiste na alteração da posição do Nível Freático para diferentes profundidades. De modo a atender a este objectivo elaboraram-se vários modelos com sucessivos rebaixamentos do Nível Freático, para posteriormente serem comparados com o modelo original de Ledsgard. Para tal foram então concebidos quatro modelos de terreno com o Nível Freático à cota -1,10, -4,10, -8,60 e -14,60 m, respectivamente.

Quando o Nível Freático se encontra à superfície, o carregamento instantâneo, produzido pelos comboios de AV, é suportado pela componente hidrostática do maciço.

Sendo a água um material incompressível, sabe-se que o valor do coeficiente de Poisson é 0,50, que é aproximadamente o mesmo valor adoptado para os diferentes estratos do maciço, quando o Nível Freático se encontra acima dessas respectivas camadas. De modo a considerar a ausência de água nos estratos, admitiu-se um coeficiente de Poisson nesse material de 0,35.

Os solos são em muitos casos anisotrópicos pela natureza e arranjo das suas partículas. No entanto, a condição de isotropia é válida em terrenos onde os solos mantêm uma constituição uniforme por distâncias da ordem de algumas vezes a menor dimensão da área de carregamento. Perante um meio isotrópico, como já foi visto anteriormente, são suficientes duas constantes elásticas para descrever o comportamento do solo. Desta forma, conhecendo o coeficiente de Poisson e não havendo alteração do módulo de distorção, é possível obter os módulos de deformabilidade das diferentes camadas de solo, recorrendo para tal à expressão 15. Na Figura 83 é possível identificar as propriedades dos solos para as diferentes posições do Nível Freático.

A criação destes modelos permitiu aferir a evolução dos deslocamentos, velocidades e acelerações à medida que se aumenta a profundidade do Nível Freático. Quanto aos deslocamentos constatou-se que geralmente existe uma diferença mais acentuada deste parâmetro na passagem do Nível Freático da cota $z = -1,10$ m para $z = -4,10$ m, como se pode ver na Figura 84.

Para os comboios Eurostar, Thalys e TGV, as mais elevadas amplitudes dos deslocamentos, ocorrem à velocidade de 175 km/h (Figura 84b)). No caso do X2000 e do Virgin apenas se verifica este acontecimento aos 202 km/h (Figura 84c)) enquanto que no ETR e ICE tal facto acontece apenas aos 225 km/h (Figura 84d)).

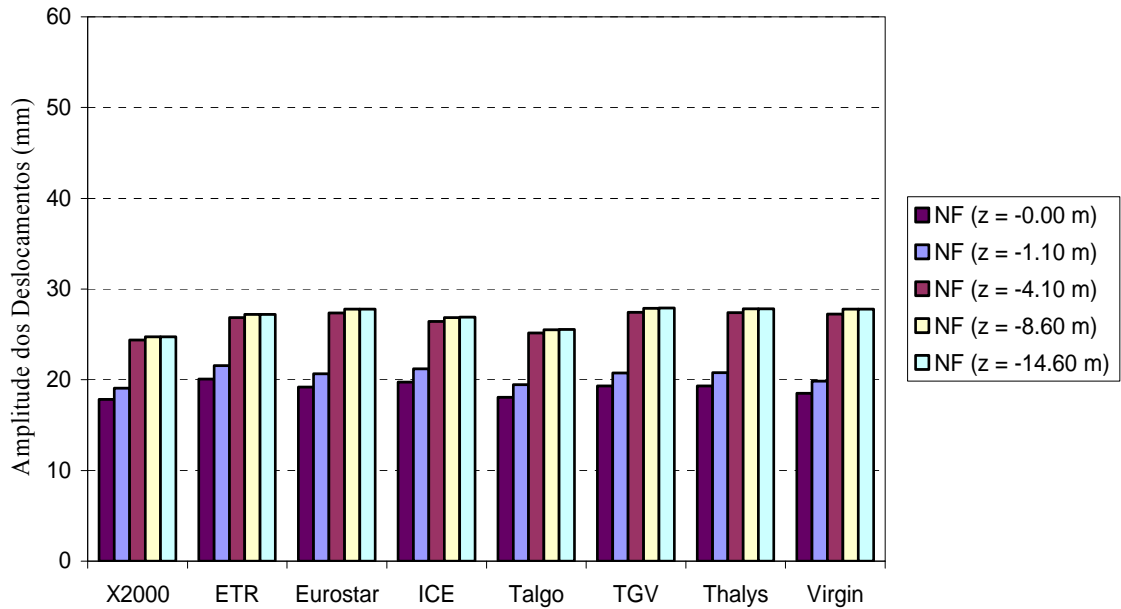
Para velocidades acima dos 225 km/h é possível observar amplitudes mais elevadas em maciços onde o nível freático se encontra mais próximo da superfície. Esta situação verifica-se por exemplo, para os comboios Thalys, TGV e Virgin a 225 km/h (Figura 84d)). O comboio Talgo é geralmente aquele que apresenta amplitudes mais baixas, sendo a maior obtida para a velocidade de 175 km/h. No caso do Talgo as amplitudes são sempre superiores mais elevadas quanto mais profundo for a posição do Nível Freático.

Se compararmos a Figura 64a) com os gráficos em anexo, A.11a), A.14a), A.17a) e A.20a) e a Figura 64b) com os gráficos em anexo, A.11b), A.14b), A.17b) e A.20b), constatamos que a maior variação dos factores de amplificação acontece precisamente na passagem do Nível Freático da cota $z = -1,10$ para $z = -4,10$ m. Neste intervalo verifica-se um aumento significativo das amplificações dos deslocamentos positivos para o caso dos comboios X2000, ETR, ICE e Virgin enquanto que o Talgo sofre uma ligeira atenuação. Os factores de amplificação dos deslocamentos negativos também comportam algumas alterações na sua configuração. Os comboios ICE e ETR são os únicos que propiciam um aumento desse factor enquanto que para os restantes comboios estes valores são ligeiramente inferiores.

A Figura 84 ilustra a evolução da amplitude máxima dos deslocamentos para quando o Nível Freático se situa à cota $z = 0,00$ m (à superfície), $z = -1,10$ m, $z = -4,10$ m, $z = -8,60$ m e $z = -14,60$ m. A figura

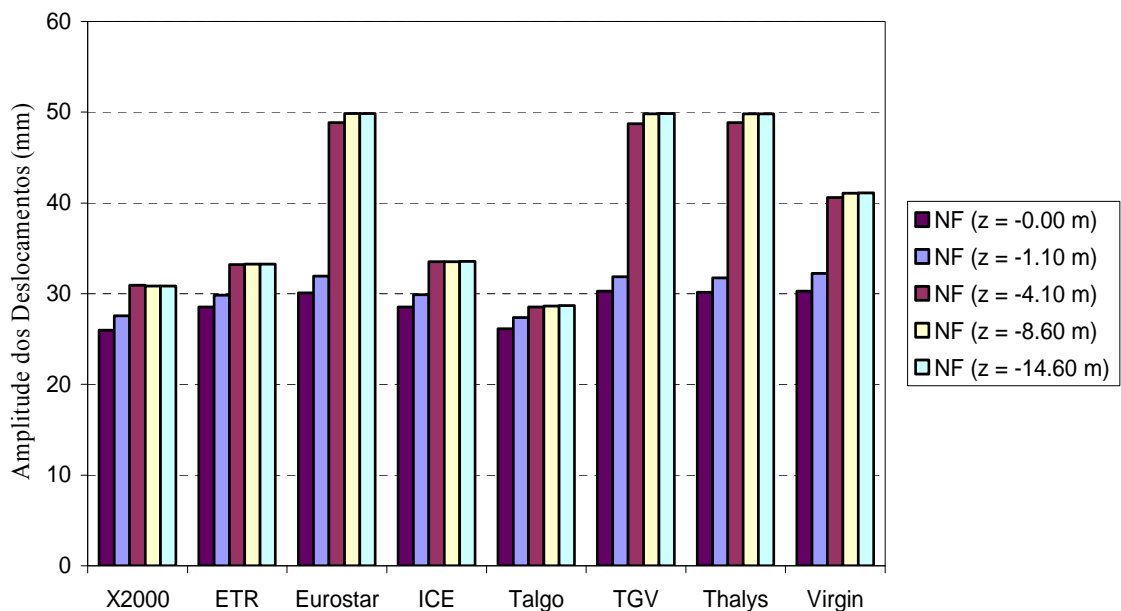
apresenta a variação deste parâmetro considerando que o maciço é submetido à passagem de comboios de AV às velocidades de 150, 175, 202, 225 e 250 km/h.

Alteração do Nível Freático (V = 150 km/h)



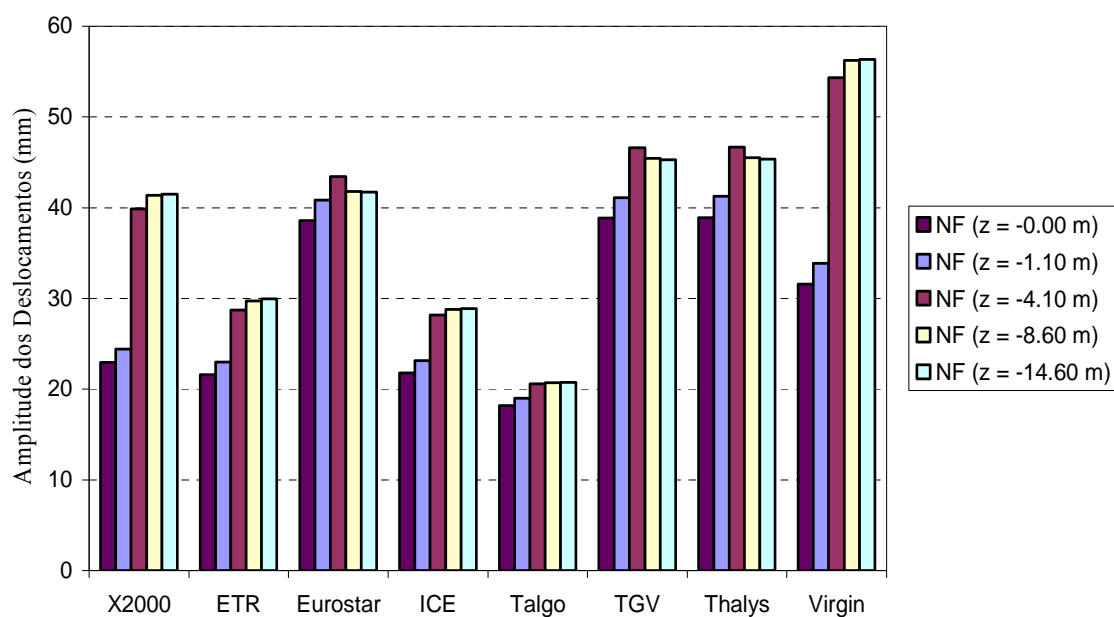
a)

Alteração do Nível Freático (V = 175 km/h)



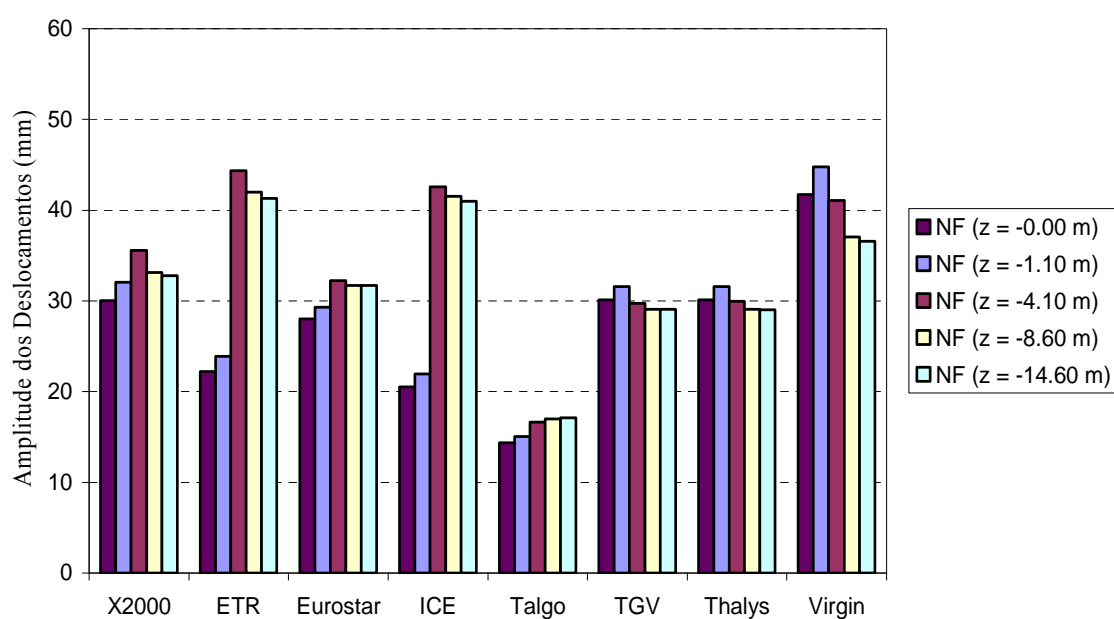
b)

Alteração do Nível Freático (V = 202 km/h)



c)

Alteração do Nível Freático (V = 225 km/h)



d)

Alteração do Nível Freático (V = 250 km/h)

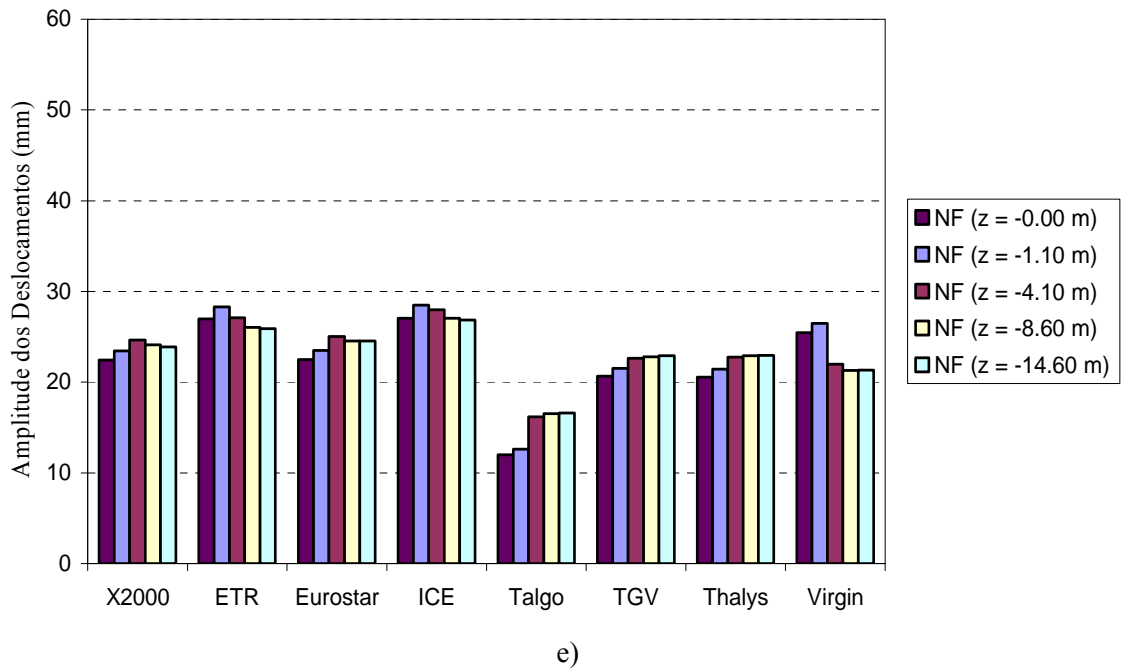


Figura 84 – Variação máxima dos deslocamentos, para diferentes posições do Nível Freático, à passagem de comboios de AV com velocidade de circulação: a) 150 km/h; b) 175 km/h; c) 202 km/h; d) 225 km/h; e) 250 km/h

No Quadro 14 apresentam-se os deslocamentos máximos para às diferentes profundidades do NF.

Quadro 14 – Deslocamentos máximos na via para diferentes profundidades do Nível Freático

Comboio		Posição do Nível Freático				
		NF 0,00 m	NF -1,10 m	NF -4,10 m	NF -8,60 m	NF -14,60 m
X2000	δ^+ (mm)	11,04	11,73	14,97	15,09	15,05
	δ^- (mm)	-19,37	-20,63	-24,89	-26,31	-26,46
ETR	δ^+ (mm)	9,61	9,93	16,33	14,68	14,21
	δ^- (mm)	-18,91	-19,93	-28,05	-27,32	-27,09
ICE	δ^+ (mm)	9,04	9,54	15,42	14,48	14,12
	δ^- (mm)	-19,90	-20,97	-27,15	-27,08	-26,88
Talgo	δ^+ (mm)	8,43	8,74	7,40	7,38	7,35
	δ^- (mm)	-17,69	-18,61	-21,12	-21,26	-21,32
TGV	δ^+ (mm)	16,28	17,26	18,50	19,16	19,14
	δ^- (mm)	-22,59	-23,85	-30,29	-30,67	-30,71
Virgin	δ^+ (mm)	16,84	18,17	22,41	22,97	22,89
	δ^- (mm)	-24,90	-26,61	-31,95	-33,28	-33,47

Os factores de amplificação das velocidades e das acelerações não variam muito de uns maciços para os outros, como se pode comprovar pelas figuras em anexo (A.12, A.13, A.15, A.16, A.18, A.19, A.21 e A.22). No entanto as pequenas divergências que se conseguem observar, ocorrem, tal como no caso dos deslocamentos, na transição do Nível Freático da cota $z = -1,10$ m para $z = -4,10$ m.

As velocidades verticais têm tendência a aumentar à medida que aumenta a profundidade do Nível Freático, sendo em geral o aumento mais brusco na alteração da posição do nível freático para uma localização abaixo da camada de argila orgânica. As passagens dos comboios X2000 e Virgin são as que evidenciam mais esse aumento, como se pode constar pela figura do anexo A.30.

Relativamente às acelerações verticais estas desenvolvem-se de uma forma interessante. Quando o Nível Freático é rebaixado para a cota $z = -1,10$ m, ou seja abaixo da crosta, as acelerações diminuem brutalmente. Por outro lado quando o Nível Freático é rebaixado de $z = -1,10$ m para $z = -4,10$ m, estas voltam a aumentar com a mesma intensidade. Ao rebaixar posteriormente o Nível Freático, tanto para a cota $z = -8,60$ m como $z = -14,60$ m, as divergências já não tão significativas, ou seja, as acelerações a partir do rebaixamento de $z = -4,10$ m começam a tender para valores próximos uns dos outros.

É importante referenciar, que o comboio Talgo, que é comboio que exhibe em geral deslocamentos na via inferiores, é por outro lado o que apresenta acelerações mais elevadas, com uma diferença significativa em relação aos restantes comboios analisados. Tal deve-se ao facto de este comboio dispor de uma configuração de eixos de carga diferente dos restantes comboios, influenciando deste modo a resposta dinâmica.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A AV é actualmente uma aposta central da política europeia de transportes. A ampliação da rede transeuropeia propulsiona o desenvolvimento regional das áreas afectadas conferindo uma maior coesão e integração no espaço europeu. O sucesso comprovado em projectos já em serviço é determinante na opção deste meio de mobilidade por parte das entidades governamentais. Muitos países já demonstraram interesse em associar-se a este projecto altamente tecnológico. Portugal, por sua vez, dispõe actualmente de um Projecto Nacional de Alta Velocidade, que visa a integração do país no espaço ibérico e europeu. Os principais objectivos nacionais envolvidos neste programa prendem-se com a criação de:

- Um sistema de transportes moderno, sustentável e eficiente;
- Uma fachada atlântica competitiva à escala europeia;
- Um motor de desenvolvimento regional;
- Um projecto potenciador de emprego, desenvolvimento económico e tecnológico;
- Um mecanismo capaz de forçar a competitividade do sistema portuário, aeroportuário, ferroviário convencional e logístico.

Apesar das diferentes vantagens que este sistema de transporte possa preconizar para a Europa e para Portugal, existem no entanto vários inconvenientes que levam a necessidade da realização de estudos, de modo a garantir qualidade e eficiência por parte deste mecanismo. Uma dessas desvantagens pode ser originada pelo comportamento dinâmico do sistema via-solo em função das condições de fundação.

A investigação realizada neste trabalho prende-se justamente com avaliação e/ou previsão deste problema técnico recorrendo para tal a ferramentas numéricas capazes de prever estes efeitos.

Como qualquer modelo numérico, este foi devidamente calibrado e validado para poder ter algum significado real. No entanto é importante salientar que a validação apenas é passível de ser feita para o comboio X2000, uma vez que este é o único comboio a circular na Suécia (Ledsgard).

Normalmente, os modelos baseados nos MIT são adequados para estudar estruturas infinitas, reduzindo consideravelmente o tempo de cálculo, comparativamente aos modelos numéricos. Através

de um equipamento informático convencional (CPU T2300 @ 1.66 GHz, 1.00 GB de RAM) obtiveram-se geralmente tempos do cálculo na ordem dos 90 a 120 minutos.

As simulações efectuadas ao caso de Ledsgard, permitiram concluir que o comportamento dinâmico é bastante influenciado pelas velocidades de circulação dos comboios, assim como, pela geometria e cargas por eixo. A velocidade de circulação é um parâmetro que afecta claramente a resposta do sistema, tal pode ser comprovado, comparando as respostas obtidas a uma velocidade de 70 km/h (comportamento estático) e 202 km/h (comportamento dinâmico).

Foram efectuadas simulações com algumas alterações ao nível do modelo de cálculo. Uma delas consistiu em considerar diferentes esquemas de interacção (Ponto médio, Deslocamento médio). Nas simulações, onde se considerou a interacção tendo em conta o deslocamento médio da via, obtiveram-se amplitudes de deslocamentos inferiores, na ordem dos 10 %.

Outra modificação do modelo consistiu em alterar as condições de fronteira do maciço i.e., considerar que o maciço se encontra assente numa fundação infinitamente rígida (“Bedrock”) em vez de se adoptar o habitual semi-espaco indefinido (“halfspace”). Nas simulações em que foram aplicadas fundações rígidas, obtiveram-se deslocamentos ascendentes superiores e deslocamentos descendentes inferiores, em relação aos modelos, em que foram adoptados semi-espacos indefinidos.

Nesse mesmo caso de obra analisado, foram efectuadas diferentes simulações correspondendo a diferentes cenários possíveis de ocorrer. Um deles consistiu em alterar a posição do Nível Freático para diferentes cotas. Ao modificar a posição do Nível Freático, verificou-se um agravamento do comportamento dinâmico, sendo a situação mais gravosa a partir da profundidade de 1,10 m. Existe uma variação dos parâmetros (deslocamentos, velocidades e acelerações) bastante elevada quando o Nível Freático é transportado para a profundidade de 4,10 m. É interessante observar que quando se efectua esta transição do Nível Freático, os deslocamentos máximos para os diferentes comboios passam a ocorrer para diferentes velocidades de circulação, sendo para alguns comboios, velocidades superiores enquanto para outros, velocidades inferiores. No caso dos comboios X2000 e Virgin, os deslocamentos máximos que antes da alteração do Nível Freático ocorriam para a velocidade de 225 km/h, passaram a ocorrer aos 202 km/h. Nos comboios ETR e ICE passou dos 175 km/h para os 225 km/h, enquanto que no caso do comboio TGV, passou dos 202 km/h para os 175 km/h.

As alterações do Nível Freático a partir dos 4,10 m até aos 14,60 m de profundidade, não registaram uma variação significativa do comportamento dinâmico.

O comboio Talgo, apesar de ser aquele que apresenta geralmente menores deslocamentos verticais na via, é por outro lado o que apresenta acelerações mais elevadas.

Constatou-se que a grande preocupação está sempre relacionada com a existência da camada de argila mole. Ao remover esta camada e considerar o prolongamento da camada subjacente até a crosta verificou-se uma melhoria substancial do comportamento dinâmico.

5.2 SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Em termos de desenvolvimentos futuros dentro do âmbito deste tema, sugere-se:

- i) Em termos de monitorização, a realização de mais ensaios experimentais, para mais variadas velocidades de circulação, de modo a aumentar a credibilidade do modelo numérico na fase de validação.
- ii) O estudo do comportamento dinâmico, considerando a alteração não linear da rigidez dos materiais para as diferentes velocidades de circulação dos comboios.
- iii) A realização de simulações, considerando outros modelos de via, tais como, via balastrada em camada e via não balastrada, uma vez que neste trabalho apenas foi adoptado o modelo de via balastrada em viga.
- iv) A criação de um modelo, que contemple as medidas de mitigação adoptadas no local, nomeadamente a técnica DMM.

BIBLIOGRAFIA

- Alves Costa, P. (2008). *A semi-analytical model to predict the dynamic railway behaviour – Theoretical aspects*. FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Alves Costa, P. (2008). *Moving loads on the ground – A quasi-3D transformed finite element code for layered ground*. FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Alves Costa, P., Bodare, A., Calçada, R., Silva Cardoso, A. (2008). *Um modelo de análise dinâmica de maciços sujeitos a acções de tráfego: Implementação e validação*. 11º Congresso Nacional de Geotecnia, 7 a 11 de Abril de 2008, Coimbra.
- Alves Costa, P., Bodare, A., Calçada, R., Silva Cardoso, A. (2008). *Um modelo de análise dinâmica de maciços sujeitos a acções de tráfego: Validação experimental*. 11º Congresso Nacional de Geotecnia, 7 a 11 de Abril de 2008, Coimbra.
- Barrón I. (2008). *High Speed lines in the World*. UIC High Speed Department, Paris
- Barrón I. (2008). *High Speed Rail: Development around the World*. Workshop - Noise and Vibration on High-Speed Railways, 2 e 3 de Outubro de 2008, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Botelho M. (2008). *Estados limites últimos e de utilização em terraplenagens para vias-férreas de alta velocidade: soluções para tratamento da fundação da via*. Dissertação de Mestrado, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Braile L. (2000). *Seismic Waves and the Slinky: A Guide for Teachers*. The Iris Consortium, Department of Earth and Atmospheric Sciences of Purdue University, West Lafayette – Indiana.
- Calçada R. (2008). *Interação comboio-via-macizo em Linhas de Alta Velocidade*. 11º Congresso Nacional de Geotecnia, 7 a 11 de Abril de 2008, Coimbra.
- Chopra, A. (1995). *Dynamic of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall International, Englewood Cliffs.
- Figueiredo H. (2007). *Dinâmica de Pontas Mistas Aço-Betão em linhas Ferroviárias de Alta Velocidade*. Dissertação de Mestrado, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fortunato E. (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Dissertação de Doutoramento, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fortunato E. (2006). *Caracterização Físico-Mecânica de Plataformas Ferroviárias*. 9º Ciclo de Palestras em Engenharia Civil, 3 a 31 de Maio de 2006, UNIC, Lisboa.
- Holm G., Andréasson B., Bengtsson P., Bodare A., Eriksson H. (2002). *Mitigation of Track and Ground Vibrations by High Speed Trains at Ledsgård, Sweden*. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Linköping.
- In Agência Portuguesa do Ambiente; "Interoperabilidade do sistema ferroviário transeuropeu de alta velocidade". Directiva 96/48/CE do Conselho, Bruxelas, 23 de Julho de 1996
- Karlström A., Boström A. (2005). *An analytical model for train-induced ground vibrations from railways*. Journal of Sound and Vibration, 25/April/2006, pp. 221–241, Elsevier B.V.
- Karlström A. (2006). *An analytical model for train-induced ground vibrations from accelerating trains*. Journal of Sound and Vibration, 30/Maio/2006, pp. 587–598, Elsevier B.V.

Madshus C., Kaynia A., Hoeg K. (1998). *High-Speed Railway Lines on soft ground: Evaluation and Analyses of Measurements from the West Coast Line; Dynamic response of rail-embankment-soil system*. NGI – Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.

Madshus C., Kaynia A. (1999). *High-Speed Railway Lines on soft ground: Dynamic behaviour at critical train speed*. Journal of Sound and vibration, 30/Março/2000, pp. 689-701, Academic Press.

Madshus C., Lacasse S., Kaynia A., Hårvik L. (2004). *Traffic Vibration*. PhD Course on Soil Dynamics, 9 e 10 de Novembro de 2007, NTNU, Trondheim.

Madshus C. (2007). *Traffic vibrations - measurements, signal processing, acceptance criteria, regulations*. PhD Course on Soil Dynamics, 12 a 13 de Novembro de 2007, NGI – Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.

Marcelino J. (2007). *Vibrações geradas por comboios de alta velocidade. Uma revisão*. Revista Geotecnia, Julho/2007, pp. 75-99, Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

Kaynia A., Madshus C., Zackrisson P. (2000). *Ground Vibrations from High-Speed Trains: Prediction and Countermeasure*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Junho/2000, pp. 531–537, ASCE.

Kuokkanen M. (2006). Mass and Column Stabilisation of Peat and Clay for a Road Embankment in Södertälje, Sweden. 17º European Young Geotechnical Engineers' Conference, 20 a 22 de Julho de 2006, Zagreb, Croatia.

Takemiya H. (2002). *Simulation of track-ground vibrations due to a high-speed train: the case of X-2000 at Ledsgard*. Journal of Sound and vibration, 27/Março/2003, pp. 503–526, Elsevier Science Ltd.

Takemiya H., Bian X. (2005). *Substructure Simulation of Inhomogeneous Track and Layered Ground Dynamic Interaction under Train Passage*. Journal of Engineering Mechanics, Julho/2005, pp. 699-711, ASCE.

APAC – Associação Portuguesa dos Amigos dos Caminhos-de-ferro (http://apac.cp.pt/hist_cp.htm). Consulta realizada em 12 de Junho de 2009.

China Digital Times (<http://chinadigitaltimes.net/2007/06/railway-to-tibet-poses-no-threat-to-environment-zee-news-international/>). Consulta realizada em 19 de Abril de 2009.

CP – Comboios de Portugal (<http://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vgnextoid=5c54079ffa057010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD>). Consulta realizada em 2 de Janeiro de 2009.

CIARI – Centro de Investigação e Análise em Relações Internacionais (http://www.ciari.org/opiniao/alta_velocidade_ferroviaria.htm). Consulta realizada em 20 de Dezembro de 2008.

GlobalSecurity.org (<http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/55-20/ch7.htm>). Consulta realizada em 3 de Janeiro de 2009.

MOPTC – Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações (<http://www.moptc.pt/cs2.asp?idcat=941>). Consulta realizada em 12 de Junho de 2009.

Para Ferroviário Fórum (<http://paraferroviario.7.forumer.com/a/posts.php?topic=5&start=>). Consulta realizada em 12 de Junho de 2009.

RAVE – Rede Ferroviária de Alta Velocidade, S.A. (<http://www.rave.pt>). Consulta realizada em 12 de Junho de 2009.

RTP – Rádio Televisão Portuguesa (http://tv1.rtp.pt/programas-rtp/index.php?p_id=21322&e_id=&c_id=1&dif=tv). Consulta realizada em 12 de Junho de 2009.

UIC – Union Internationale des Chemins de Fer (<http://www.uic.asso.fr/uic/spip.php?rubrique881>). Consulta realizada em 20 de Dezembro de 2008.

Wikimédia Commons – Rail transport in Bosnia and Herzegovina (http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Railroad_around_Porjecani.jpg). Consulta realizada em 19 de Abril de 2009.







Wikipédia – Comboio de alta velocidade (http://pt.wikipedia.org/wiki/Alta_velocidade). Consulta realizada em 4 de Novembro de 2008.

Wikipédia – Ferrovia (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Ferrovia>). Consulta realizada em 4 de Novembro de 2008.

ANEXOS

A.1 – Linhas de AV operacionais na Europa




























Ligação	Velocidade (km/h)	Em serviço (Ano)	Extensão (km)
 Fulda – Wurtzburgo	280	1988	90
 Hanôver – Fulda	280	1991 / 1994	248
 Mannheim – Estugarda	280	1985 / 1991	109
 Hanôver (Wolfsburg) – Berlim	250	1998	189
 Colonha – Francoforte	300	2002 / 2004	197
 Colonha – Düren	250	2003	42
 (Karlsruhe -) Rastatt – Offenburg	250	2004	44
 Lúpsia – Gröbers (- Erfurt)	250	2004	24
 Hamburgo – Berlim	230	2004	253
 Nuremberga – Ingolstadt	300	2006	89
 Bruxelas – Fronteira com a França	300	1997	72
 Lovaina – Liège	300	2002	65
 Madrid – Sevilha	270	1992	471
 Madrid – Lérida	300	2003	519
 Saragoça – Huesca	200	2003	79
 (Madrid -) La Sagra – Toledo	250	2005	21
 Córdoba – Antequera	300	2006	100
 Lérida – Camp de Tarragona	300	2006	82
 Madrid – Segóvia – Valhadolid	300	2007	179
 Antequera – Málaga	300	2007	55
 Camp de Tarragona – Barcelona	300	2008	88
 LGV Paris Sud Est	300	1981 / 1983	419
 LGV Atlantique	300	1989 / 1990	291
 LGV Contournement Lyon	300	1992 / 1994	121
 LGV Nord – Europe	300	1994 / 1996	346
 LGV Interconnexion IDF	300	1994 / 1996	104
 LGV Méditerranée	320	2001	259
 LGV Est	320	2007	332
 Roma – Florença (Primeiro Lanço)	250	1981	150
 Roma – Florença (Segundo Lanço)	250	1984	74














	Roma – Florença (Terceiro Lanço)	250	1992	24
	Roma – Nápoles	300	2006	220
	Turim – Novara	300	2006	94
	Frutigen – Visp (Túnel de base de Lötschberg)	250	2007	35
	Junção de Fawkham – Túnel	300	2003	74
	Londres – Junção de Southfleet	300	2007	39

A.2 – Linhas de AV em construção na Europa



















Ligação	Velocidade (km/h)	Em serviço (Ano)	Extensão (km)
 Munique – Augsburg	230	2010	62
 (Lípsia /Halle -) Gröbers – Erfurt	300	2015	98
 Nuremberga – Erfurt	250	2017	218
 Liège – Fronteira com a Alemanha	260	2008	36
 Antuérpia – Fronteira com os Países Baixos	300	2008	36
 Figueres – Frontera (-Perpinhã)	300	2009	20
 Barcelona – Figueres	300	2010 / 2012	132
 Madrid- Valência/Alicante/Múrcia	300	2010 / 2012	902
 Vitória – Bilbao – São Sebastião	250	2012	175
 Variante de Pajares	250	2012	50
 Ourense – Santiago	300	2012	88
 Bobadilla – Granada	250	2012	109
 Corunha – Vigo	250	2012	158
 Navalmoral – Cáceres – Badajoz – Frt. Port.	300	-	278
 Sevilha – Cádiz	250	-	152
 Hellín – Cieza (Variante de Camarillas)	250	-	27
 Sevilha – Antequera	300	-	128
 Figueres – Frontera (-Perpinhã)	300	2009	24
 Haut-Bugey (amélioration LC)	-	2009	65
 Contournement Nîmes – Montpellier	300	2012	70
 LGV Dijon – Mulhouse	320	2012	140
 Milão – Bolonha	300	2008	182
 Novara – Milão	300	2008	55
 Florença – Bolonha	300	2009	77
 Schiphol – Roterdão – Fronteira com a Bélgica	300	2008	120
 Erstfeld – Biasca (Túnel de base de São Gotardo)	250	2017	57
 Giubiasco – Lugano (Túnel de base de Ceneri)	250	2019	15

A.3 – Linhas de AV em projecto na Europa













Ligação	Velocidade (km/h)	Em serviço (Ano)	Extensão (km)
 (Karlsruhe -) Offenburg – Basileia	250	-	112
 Francoforte – Mannheim	300	-	81
 Estugarda – Ulm – Augsburg	250	-	166
 Hamburgo/Bremen – Hanôver	300	-	114
 (Hanôver -) Seelze – Minden	230	-	71
 (Francoforte -) Hanau – Fulda/Wurtzburgo	300	-	126
 Valhadolid – Burgos – Vitória	300	-	211
 Venta de Baños – Leão – Astúrias	-	-	238
 Madrid – Navalmoral de la Mata	300	-	191
 Almeria – Múrcia	-	-	190
 Valência – Castellón	-	-	64
 Olmedo – Zamora – Ourense	300	2012	323
 Palência – Santander	300	-	201
 Saragoça – Castejón – Logronho	250	-	149
 Castejón – Pamplona	300	-	75
 Ourense – Vigo (vía Cerdedo)	250	-	60
 LGV Sud Europe Atlantique S	-	2013	120
 LGV Bretagne – Pays de la Loire	-	2013	188
 LGV Est – Européenne (Second phase)	-	2014 / 2015	100
 LGV Poitiers – Limoges	-	2015	115
 LGV Sud Europe Atlantique N	-	2016	180
 LGV Bordeaux – Toulouse	-	2016	230
 LGV Rhin – Rhône Br Est (Second phase)	-	2015 / 2020	48
 LGV PACA	-	2020	200
 Interconnexion Sud IDF	-	2020	40
 LGV Bordeaux – Espagne	-	2020	230
 LGV Lyon – Turin	-	2020	150
 LGV Montpellier – Perpignan	-	2022	150
 LGV Picardie	-	2022	250
 LGV Rhin – Rhône Branche S	-	2022	100

	LGV Rhin – Rhône Branche Ouest	-	2022	85
	LGV Paris – Lyon bis	-	2025	430
	Milão – Veneza	-	-	245
	Génova – Milão	-	-	150
	Varsóvia – Lodz – Wroclaw – Poznan	300	2015	500
	Varsóvia – Katowice / Cracóvia	300	2015	212
	Lisboa – Caia (- Madrid)	350	2013	206
	Porto – Valença (- Vigo) Primeira Fase	250	2013	55
	Lisboa – Porto	300	2015	290
	Porto – Valença (- Vigo) Segunda Fase	250	-	45
	Aveiro – Almeida (- Salamanca)	250	-	170
	Évora – Faro – Vila Real de SA (- Huelva)	250	-	240
	Moscovo – São Petersburgo	300	-	650
	Estocolmo – Malmö / Gotemburgo	300	-	750

















A.4 – Linhas de AV operacionais na Ásia

Ligação		Velocidade (km/h)	Em serviço (Ano)	Extensão (km)
	Seul – Daegu	300	2004	330
	Tóquio – Osaka (Tokaido)	270	1964	515
	Osaka – Okayama (San-yo)	270	1972	161
	Okayama – Hakata (San-yo)	300	1975	393
	Omiya – Morioka (Tohoku)	275	1982	465
	Omiya – Niigata (Joetsu)	240	1982	270
	Ueno – Omiya	110	1985	27
	Tóquio – Ueno	110	1991	4
	Fukushima – Yamagata (Yamagata)	130	1992	87
	Morioka – Akita (Akita)	130	1997	127
	Takasaki – Nagano (Hokuriku)	260	1997	117
	Yamagata – Shinjo (Yamagata)	130	1999	62
	Morioka – Hachinohe (Tohoku)	260	2002	97
	Yatsuhiro – Kagoshima Chuo (Kyushu)	260	2004	127
	Taipé – Kaohsiung	300	2007	345
	Qinhuangdao – Shenyang	200	2003	442
	Jinan – Qingdao	200	2006	330
	Jinan – Qingdao	250	2006	60


A.5 – Linhas de AV em construção na Ásia





	Ligação	Velocidade (km/h)	Em serviço (Ano)	Extensão (km)
	Daegu – Busan	300		82
	Hachinohe – Shin Aomori (Tohoku)	-	2011	82
	Hakata – Shin Yatsushiro (Kyushu)	-	2011	130
	Nagano – Kanazawa (Hokuriku)	-	2015	229
	Shin Aomori – Shin Hakodate (Hokkaido)	-	2016	149
	Pequim – Tianjing	300	2008	115
	Wuhan – Cantão - Shenzhen	300	2010	1045
	Shijiazhuang – Tai Yuan (Shi-Tai Line)	250	2010	190
	Zhengzhou – Xian	250	2010	454
	Hangzhou – Ningbo – Fuzhou – Shenzhen	250	2010	1600
	Ancara – Istambul	250	2008	533
	Ancara – Konya	250	-	212

A.6 – Linhas de AV em projecto na Ásia

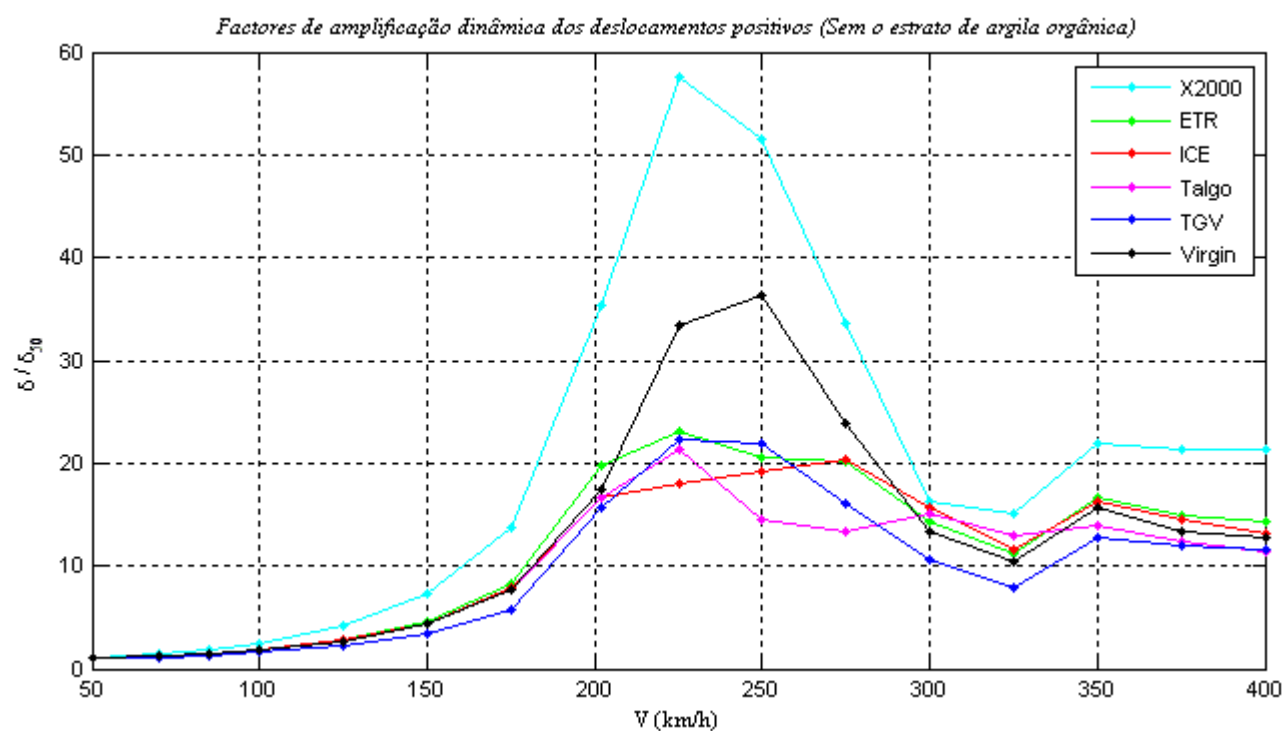
	Ligação	Velocidade (km/h)	Em serviço (Ano)	Extensão (km)
	Medina – Jidá – Meca	300	2015	550
	Bombaim – Ahmedabad	250	-	495
	Teerão – Ispão	250	-	475
	Shin Hakodate – Sapporo (Hokkaido)	-	-	211
	Kanazawa – Osaka (Hokuriku)	-	-	254
	Hakata – Nagasaki (Kyushu)	-	-	118
	Pequim – Xangai	350	2010	1320
	Pequim – Wuhan	300	2010	1100
	Harbin – Dalian	250	2010	905
	Tianjin – Qinhuangdao	250	2010	260
	Nanjung – Wuhan	250	2010	490
	Ancara – Sivas	250	-	460
	Ancara – Kayseri	250	-	175
	Ancara – Esmirna	250	-	624
	Bandirma – Bursa – Ayazma – Osmaneli	250	-	190
	Halkali – Fronteira com a Bulgária	250	-	230

A.7 – Linhas de AV operacionais e em projecto nos restantes continentes

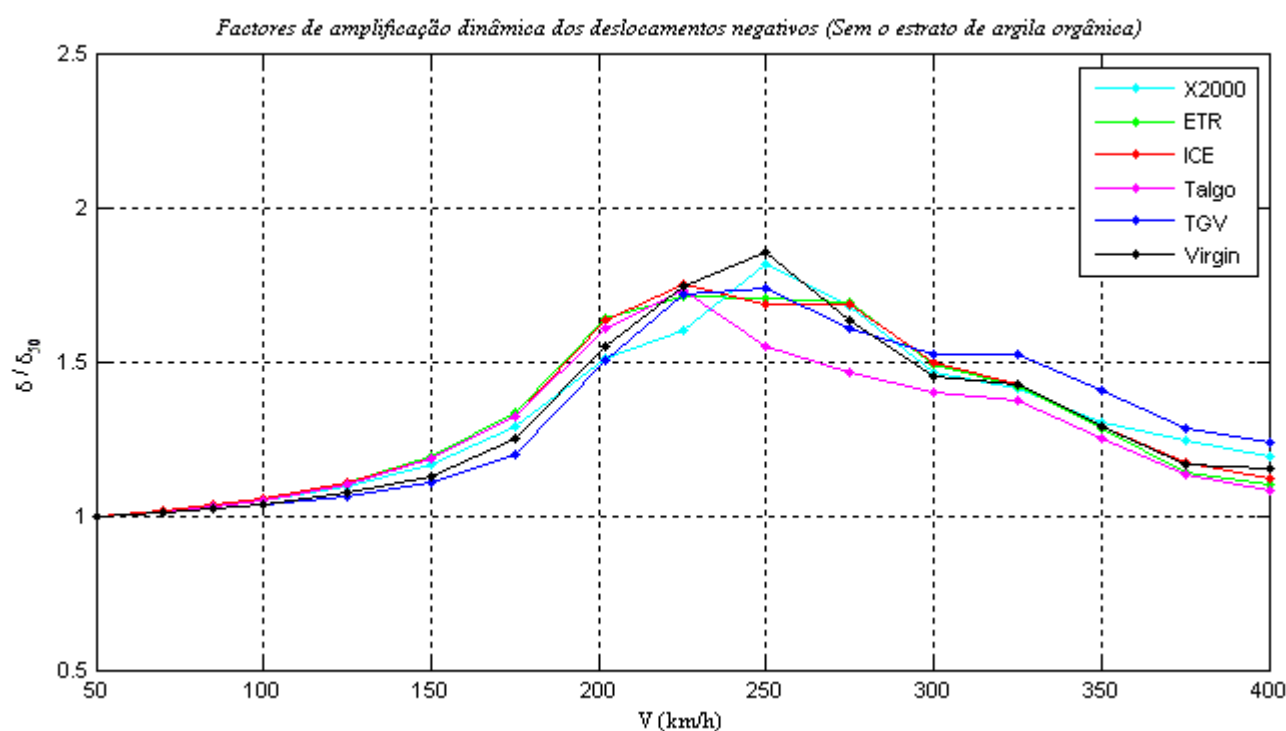
	Ligação	Velocidade (km/h)	Em serviço (Ano)	Extensão (km)
	North East Corridor ([Boston –] NY – W)	240	-	362

	Ligação	Velocidade (km/h)	Em serviço (Ano)	Extensão (km)
	Buenos Aires – Rosário	250	2020	315
	Rio de Janeiro – São Paulo	300	2025	500
	Los Angeles – Sacramento	300	2025	900
	Tânger – Marrakech	300	2015	680

A.8 – Maciço sem argila orgânica: Factores de amplificação dos deslocamentos

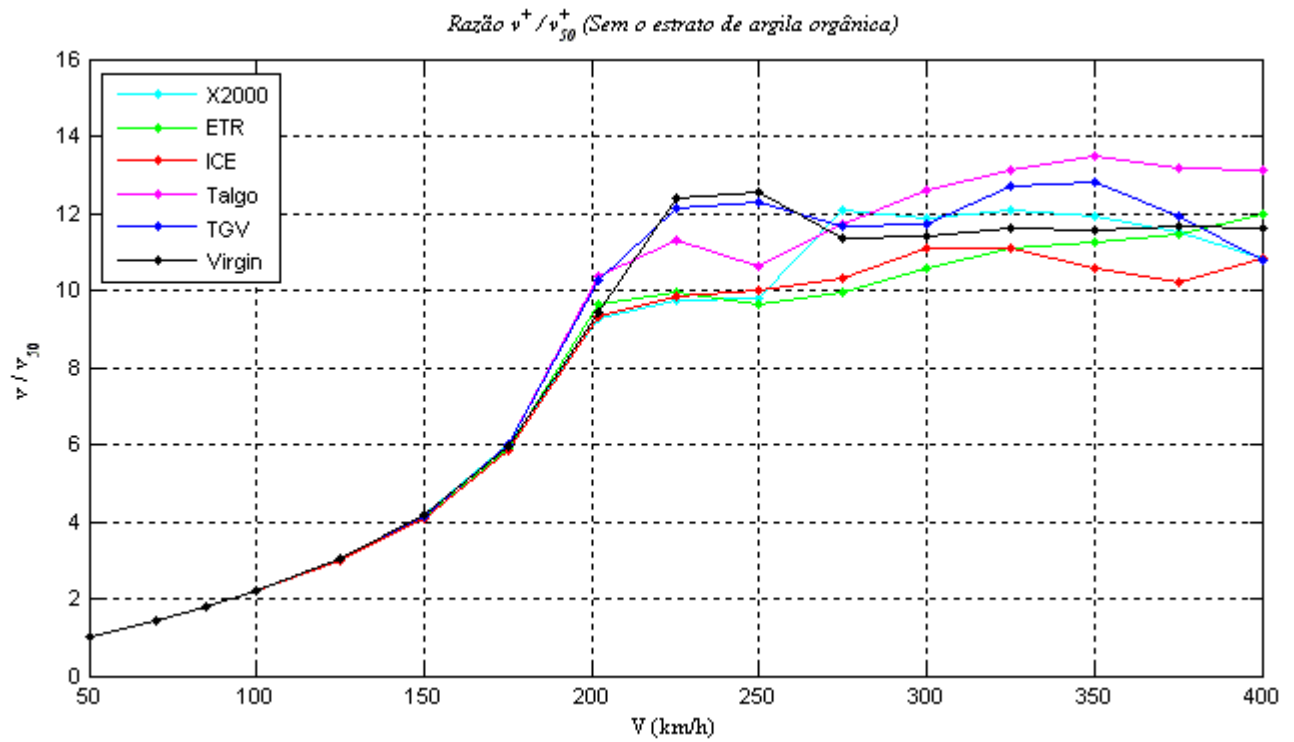


a)

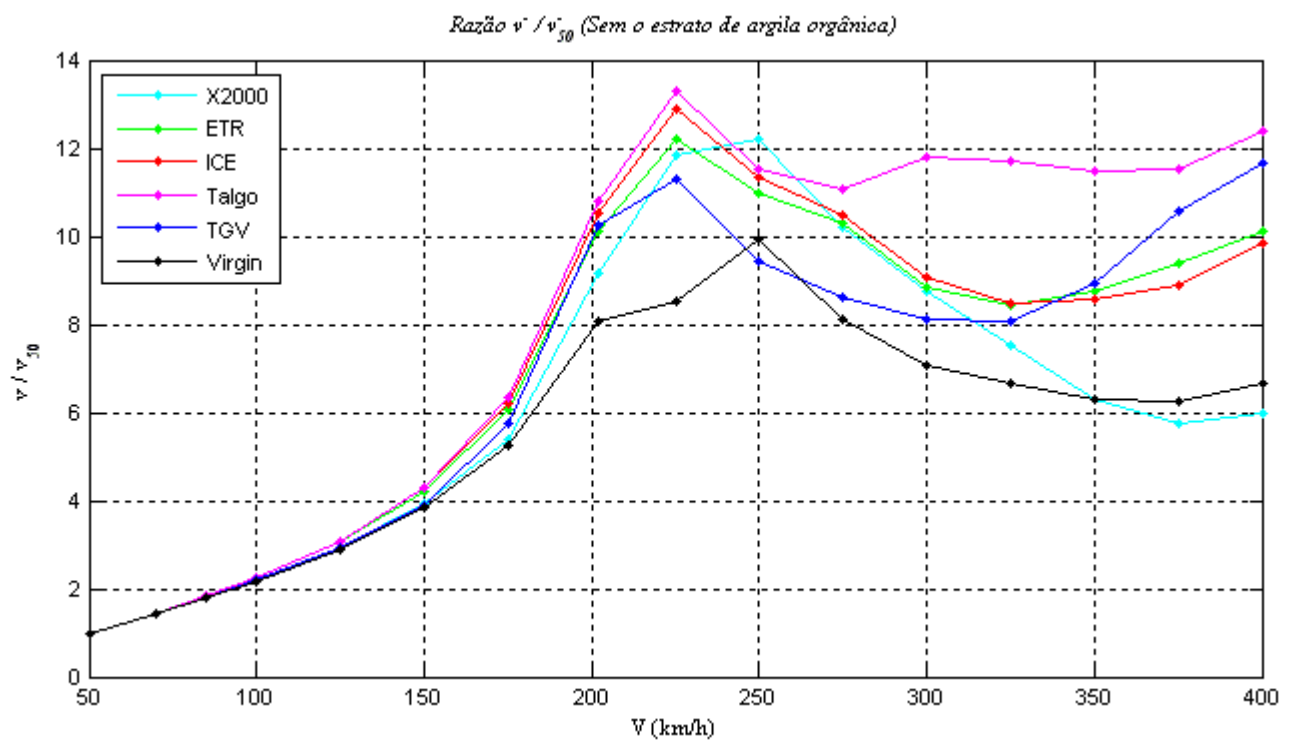


b)

A.9– Maciço sem argila orgânica: Razão entre as velocidades

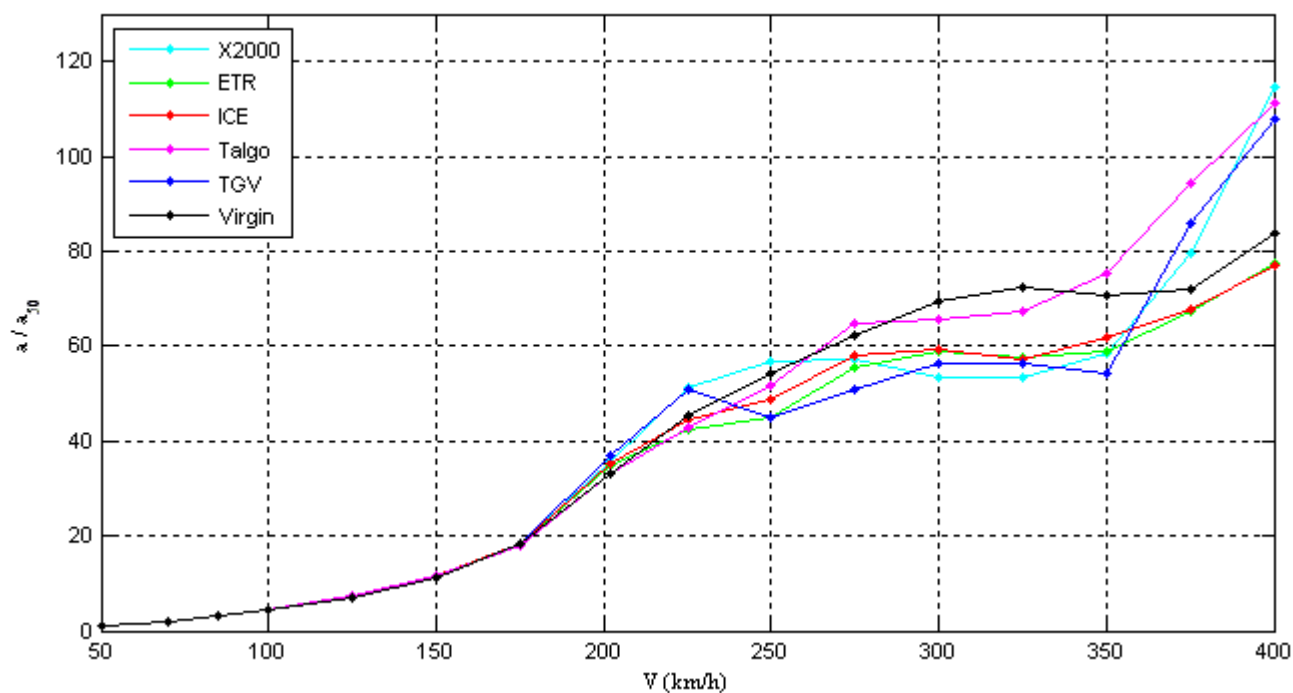


a)

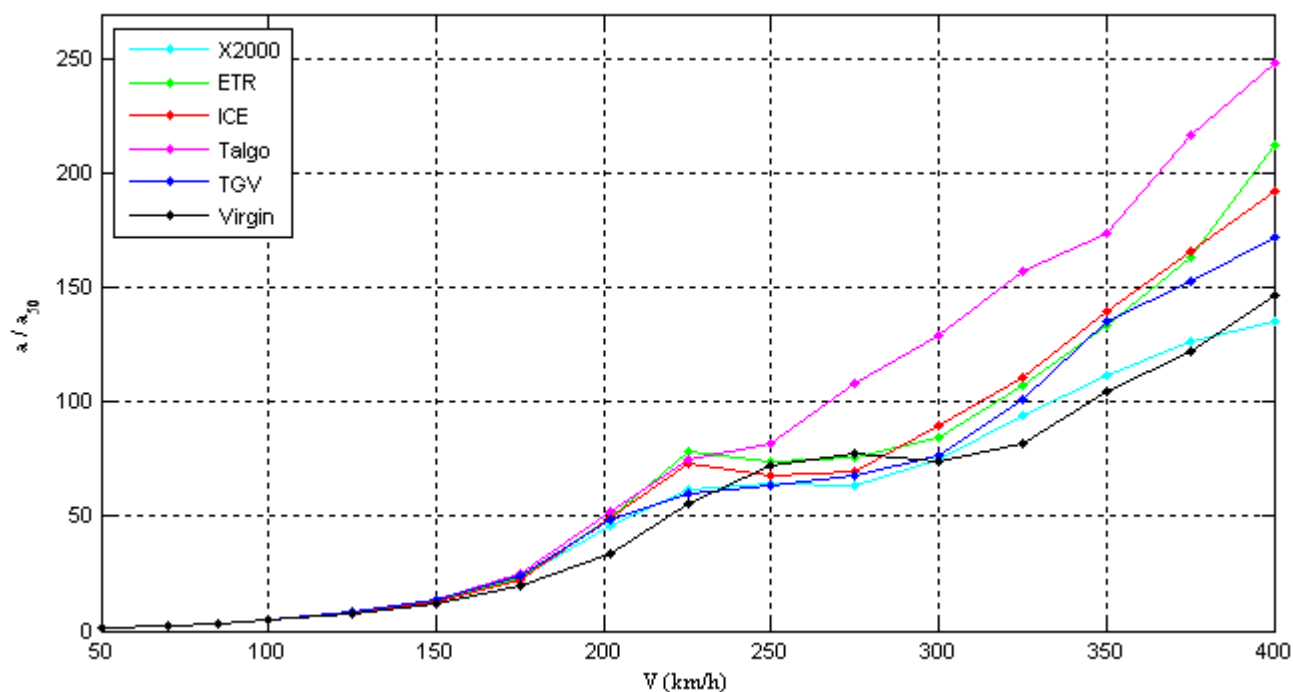


b)

A.10 – Maciço sem argila orgânica: Razão entre as acelerações

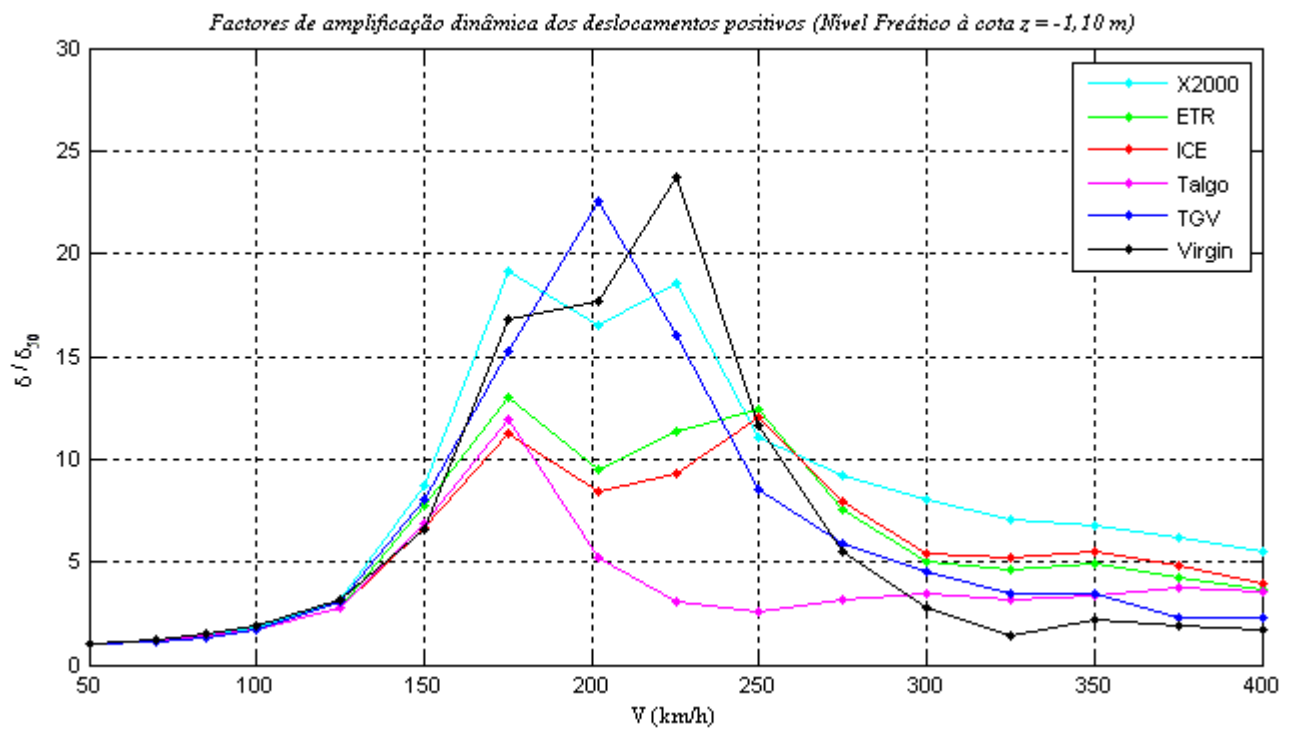
Razão a^+ / a_{50}^+ (Sem o estrato de argila orgânica)

a)

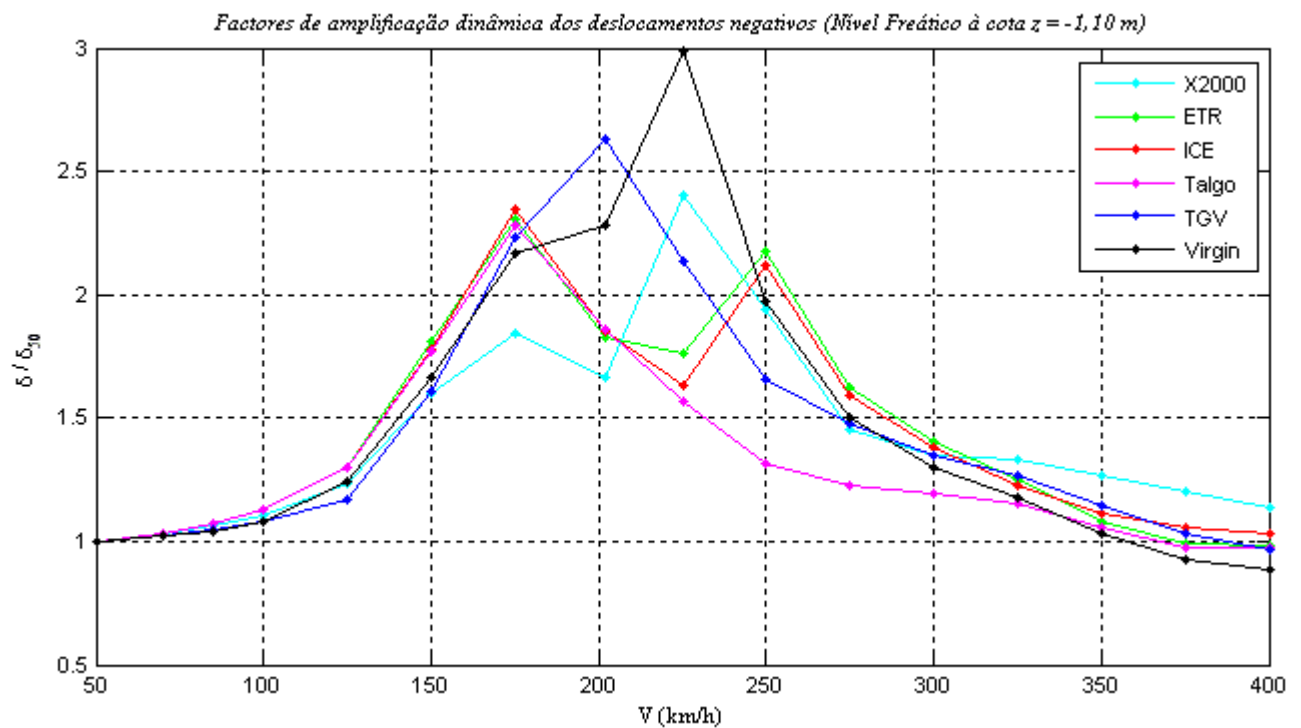
Razão a^- / a_{50}^- (Sem o estrato de argila orgânica)

b)

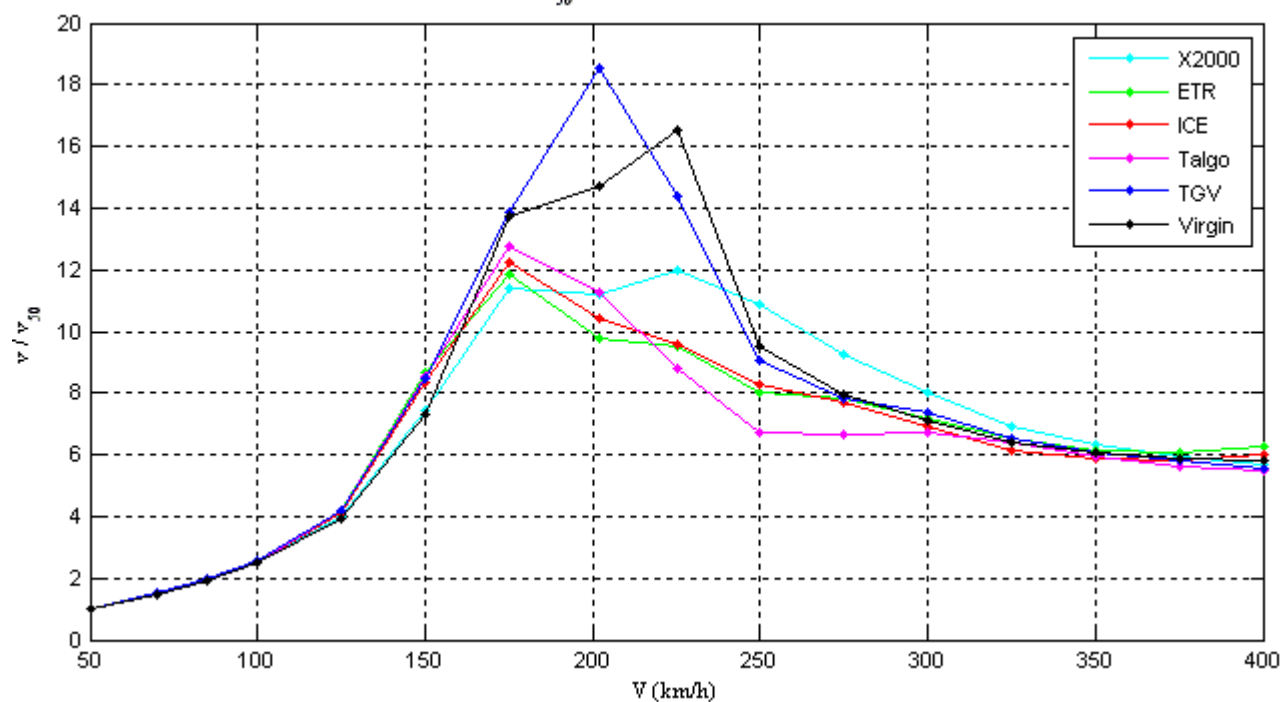
A.11 – Nível Freático à cota $z = -1,10$ m: Factores de amplificação dos deslocamentos



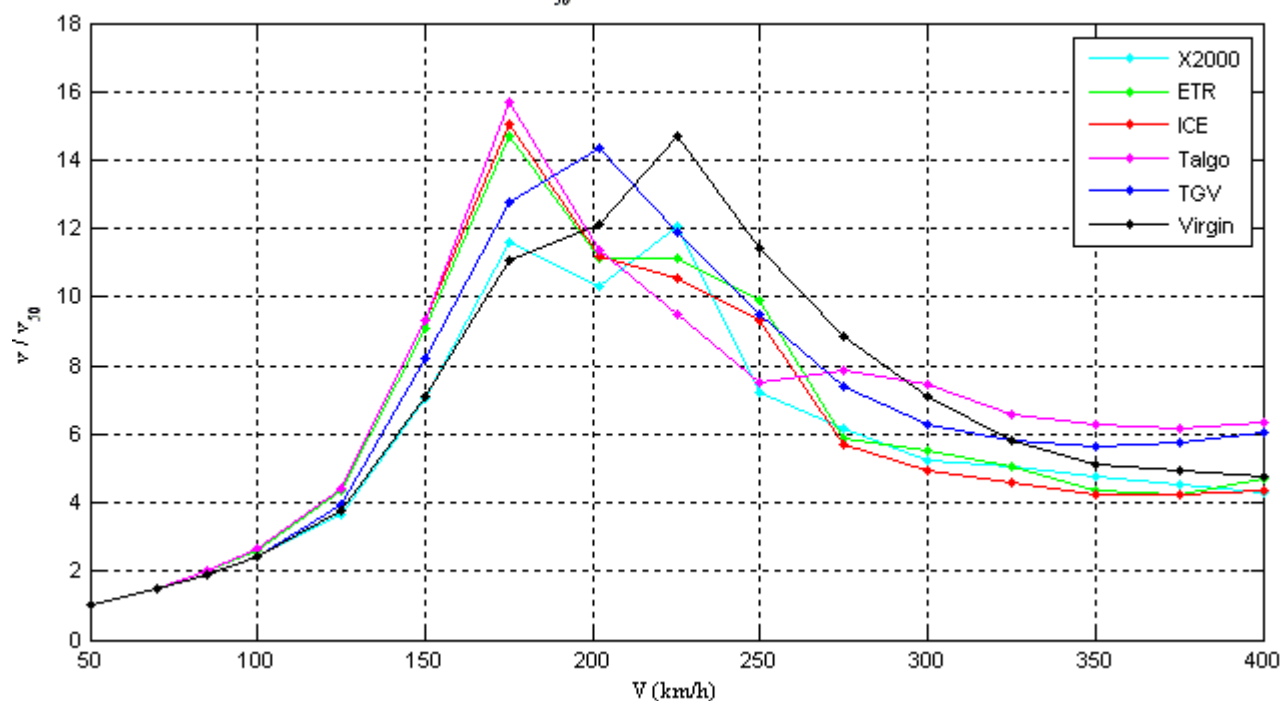
a)



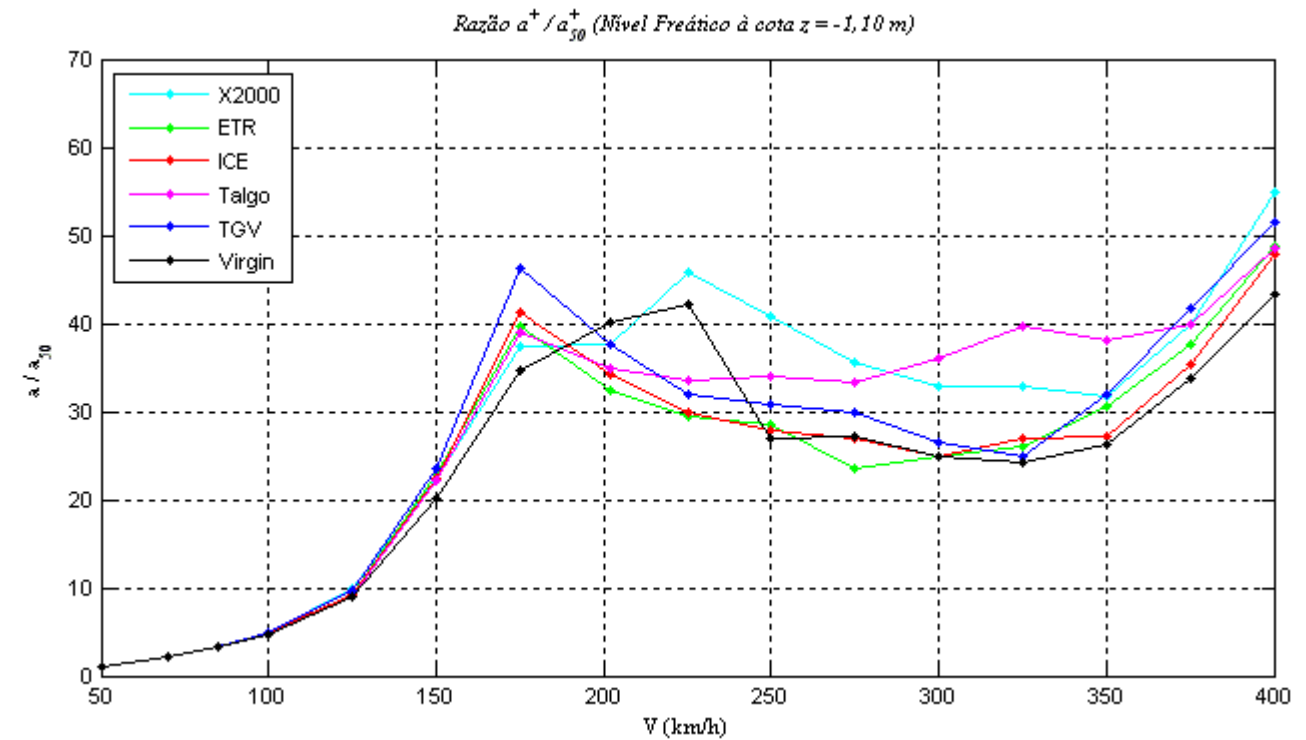
b)

A.12 – Nível Freático à cota $z = -1,10$ m: Razão entre as velocidadesRazão v^+ / v_{50}^+ (Nível Freático à cota $z = -1,10$ m)

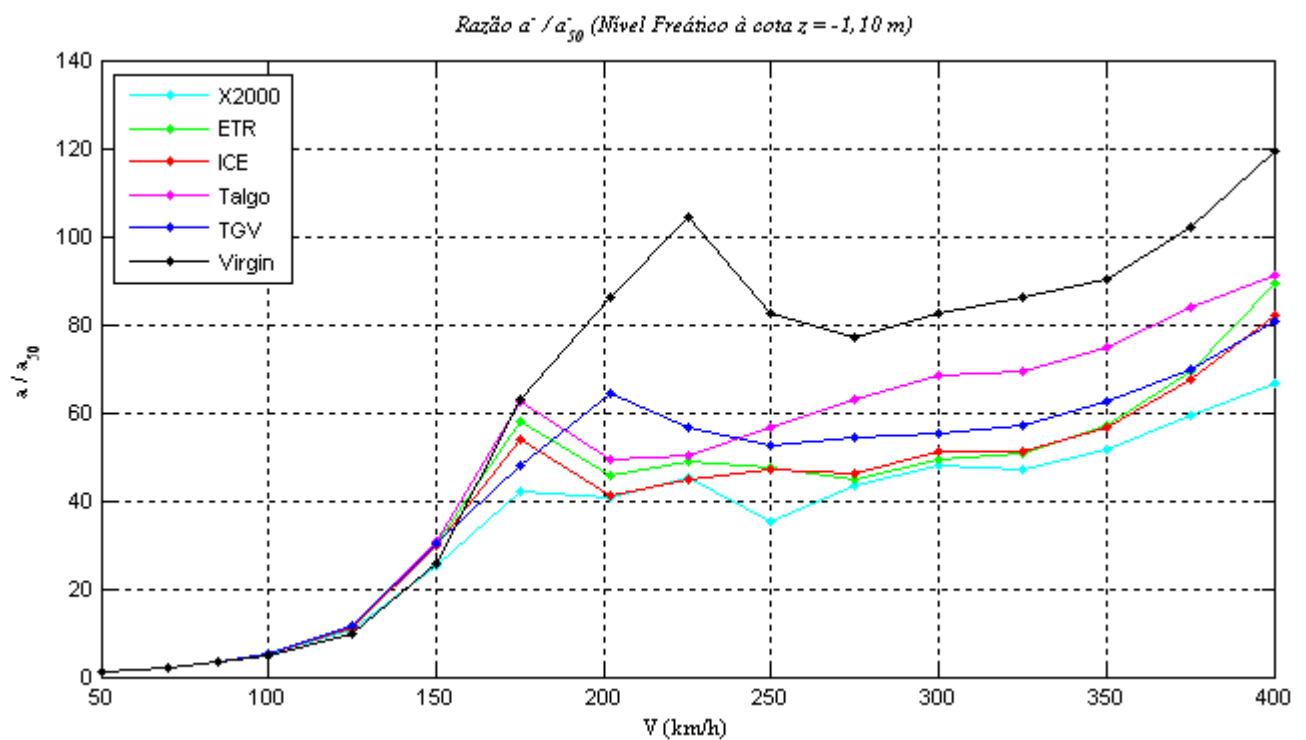
a)

Razão v^- / v_{50}^- (Nível Freático à cota $z = -1,10$ m)

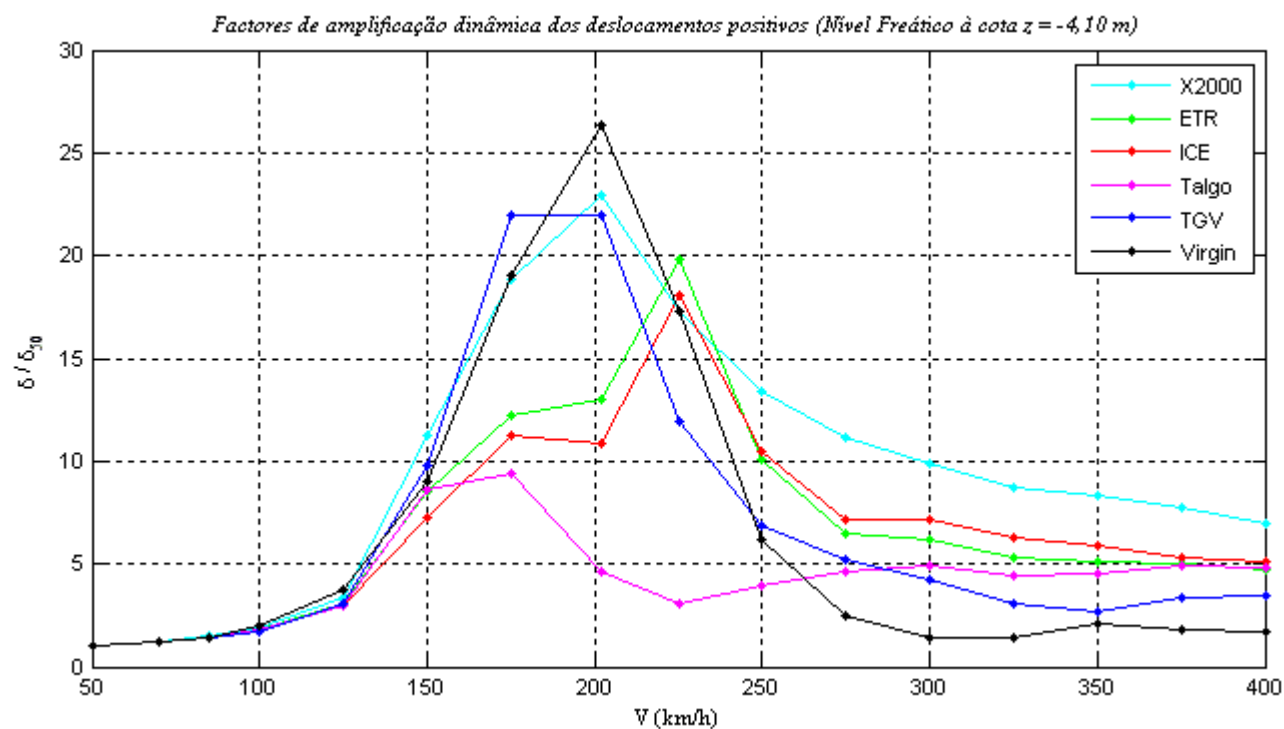
b)

A.13 – Nível Freático à cota $z = -1,10$ m: Razão entre as acelerações

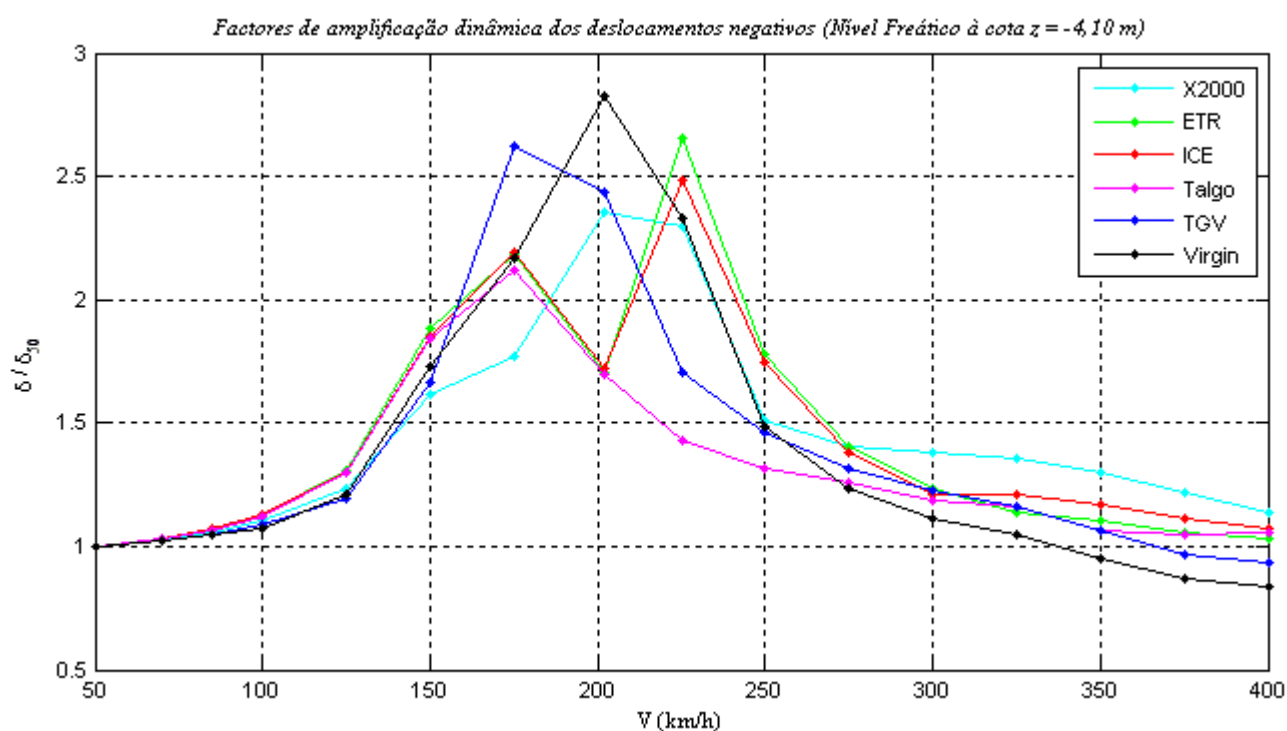
a)



b)

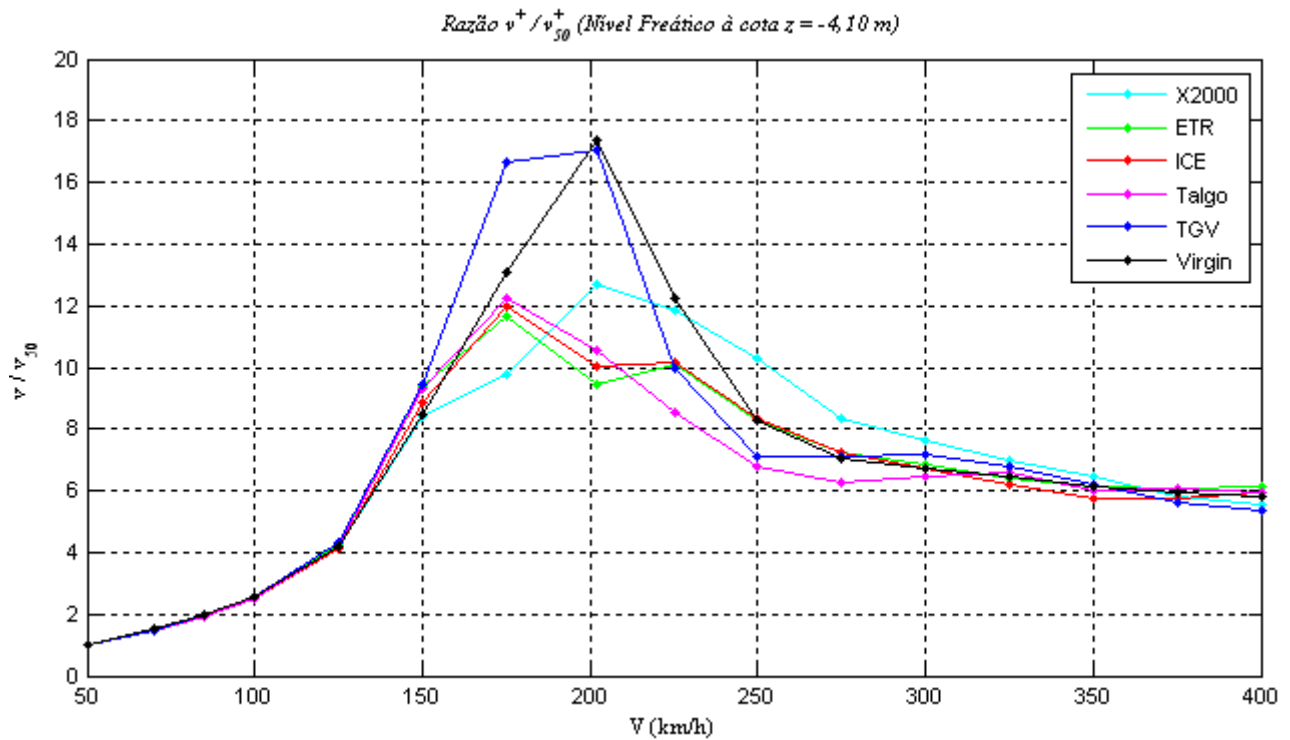
A.14 – Nível Freático à cota $z = -4,10$ m: Factores de amplificação dos deslocamentos

a)

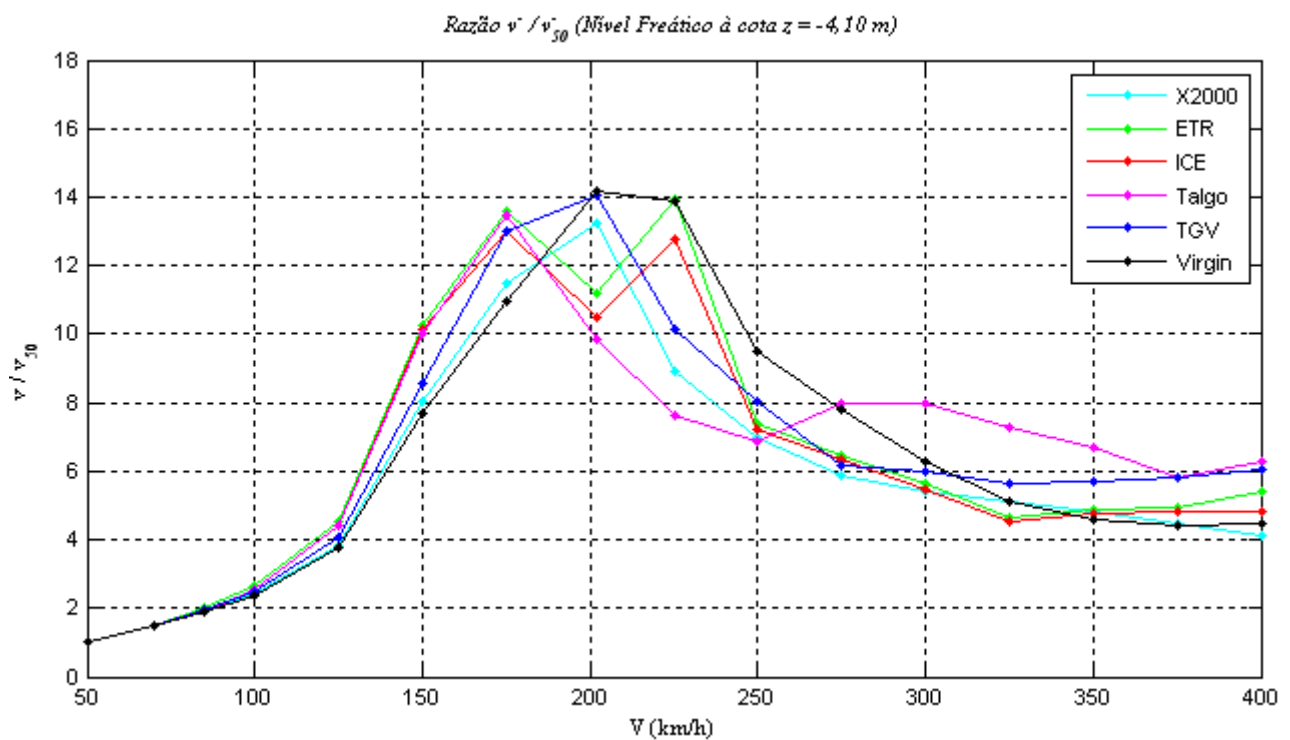


b)

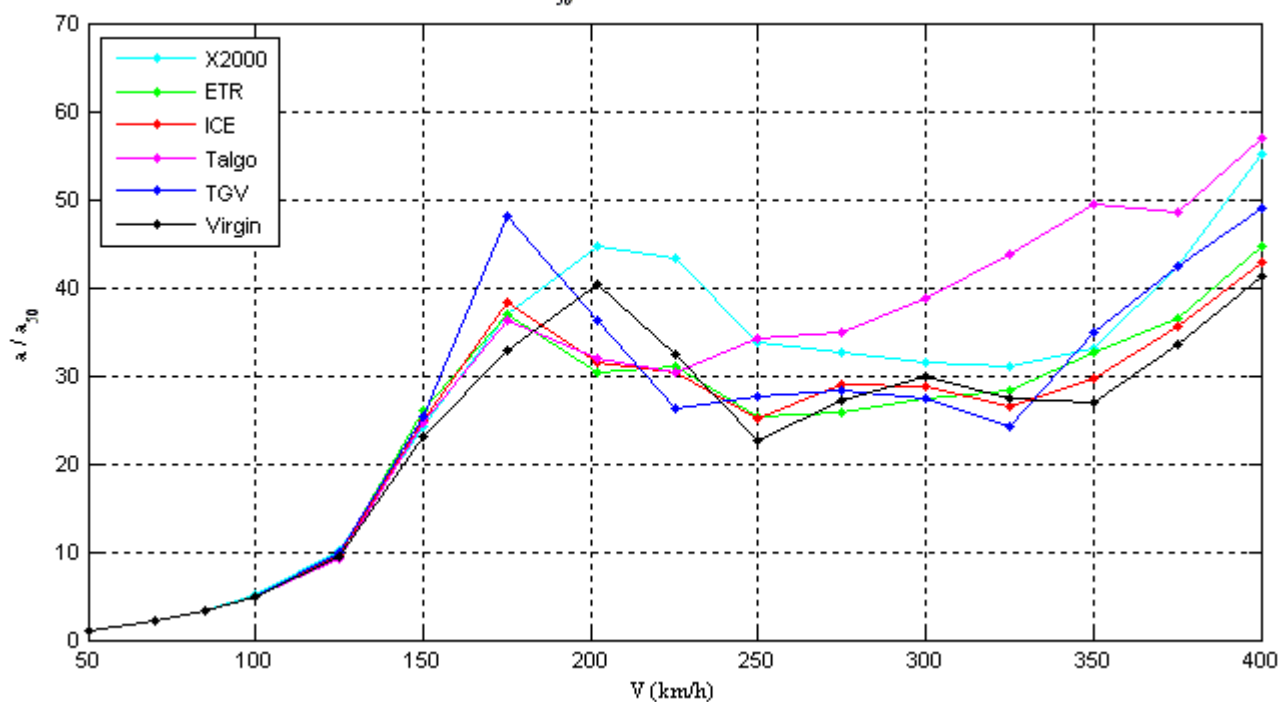
A.15 – Nível Freático à cota $z = -4,10$ m: Razão entre as velocidades



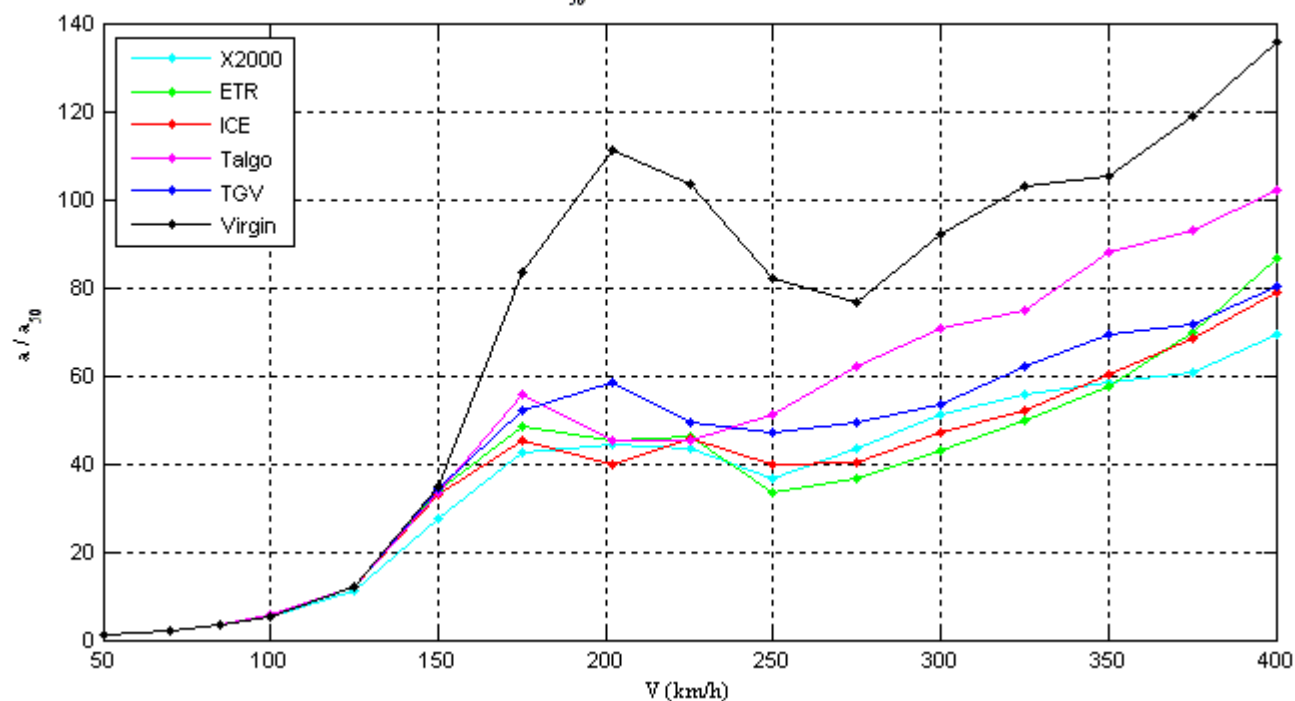
a)



b)

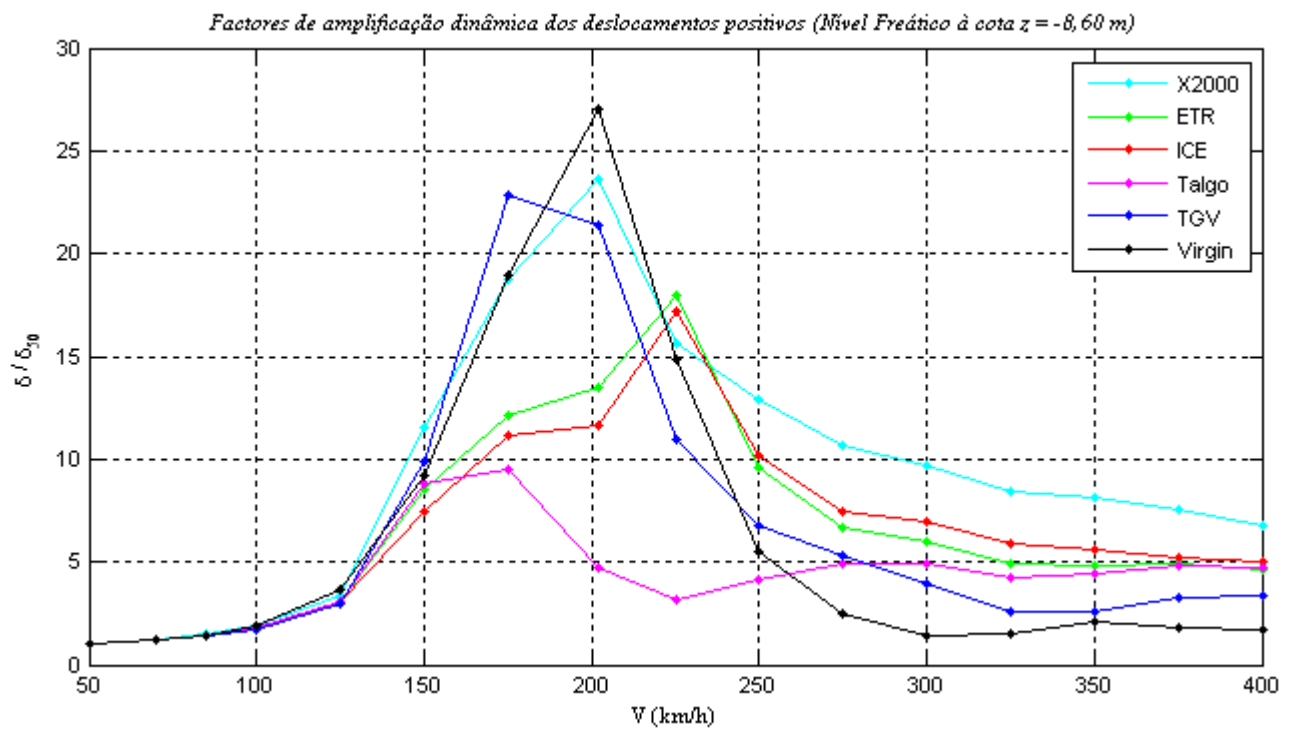
A.16 – Nível Freático à cota $z = -4,10$ m: Razão entre as aceleraçõesRazão a^+ / a_{50}^+ (Nível Freático à cota $z = -4,10$ m)

a)

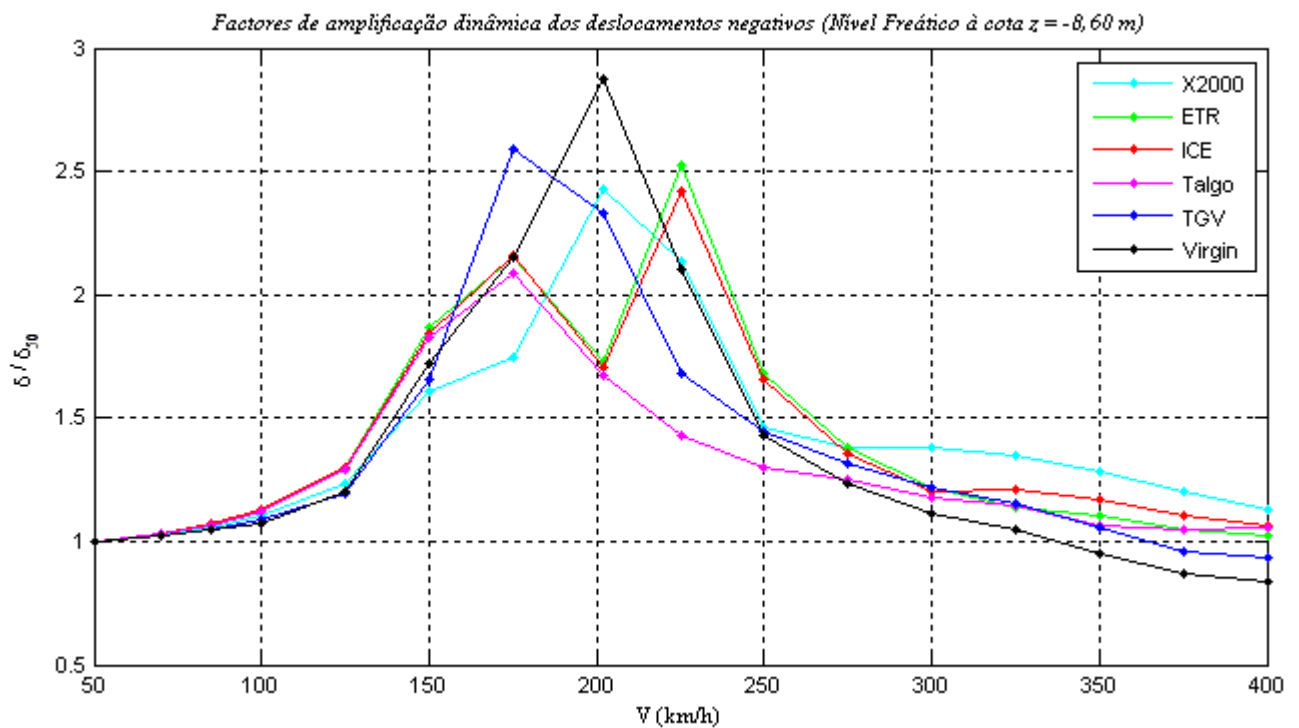
Razão a^- / a_{50}^- (Nível Freático à cota $z = -4,10$ m)

b)

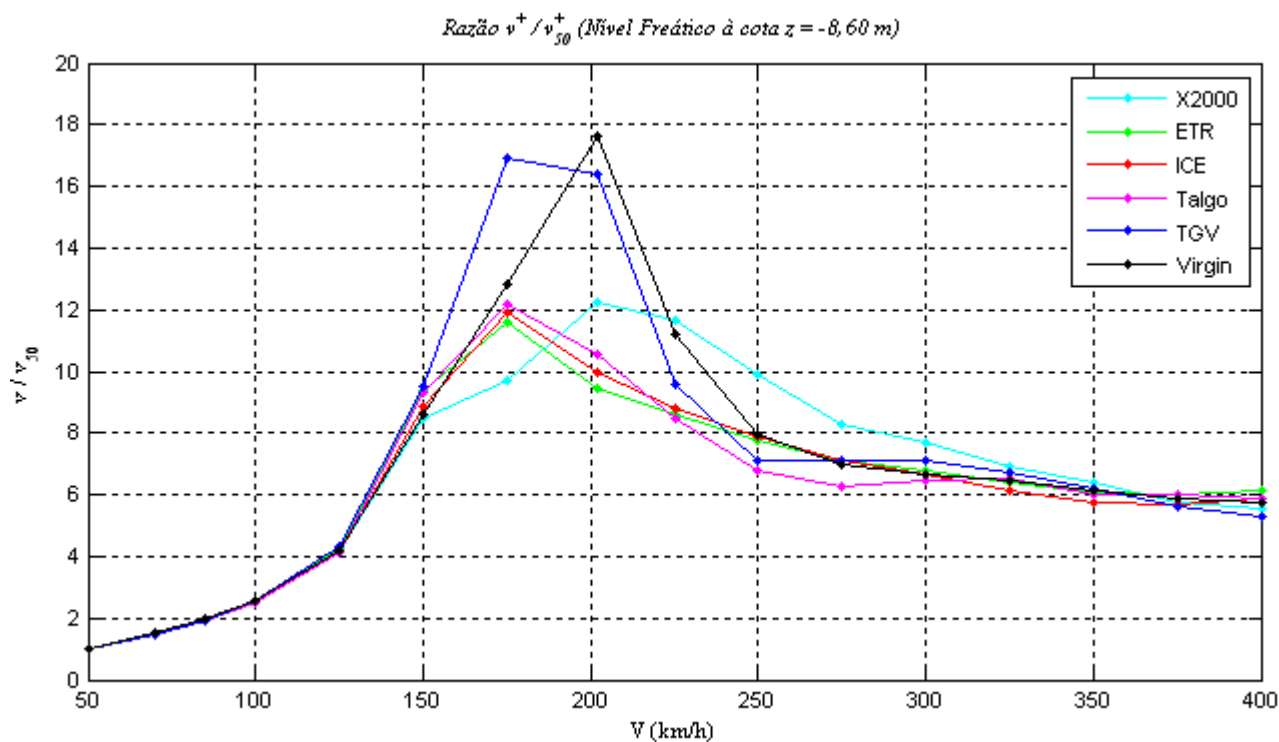
A.17 – Nível Freático à cota $z = -8,60$ m: Factores de amplificação dos deslocamentos



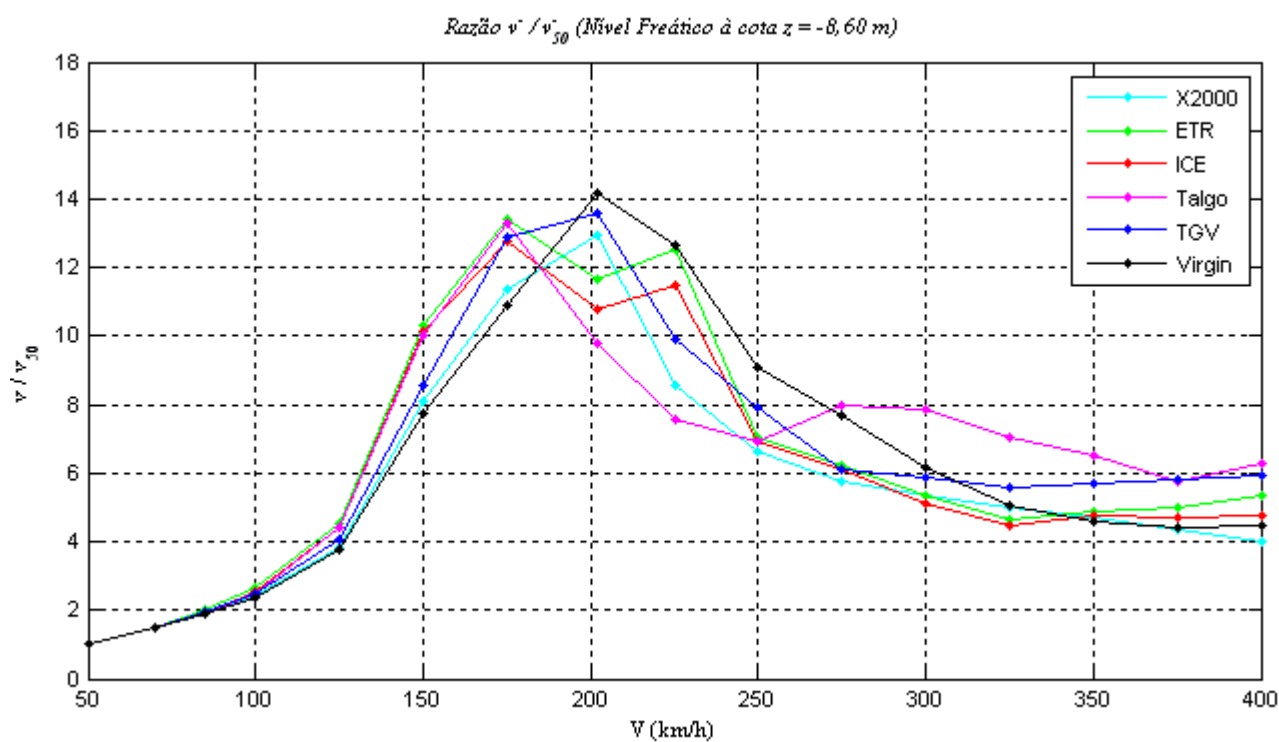
a)



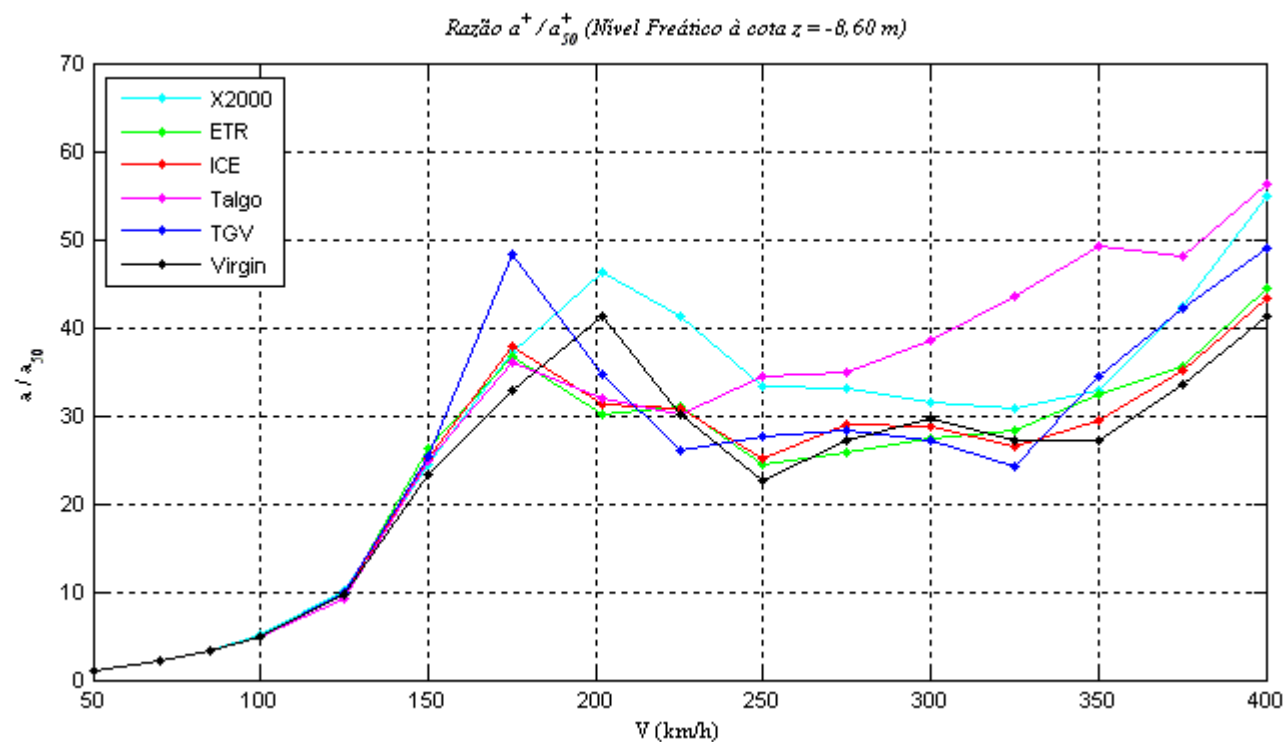
b)

A.18 – Nível Freático à cota $z = -8,60$ m: Razão entre as velocidades

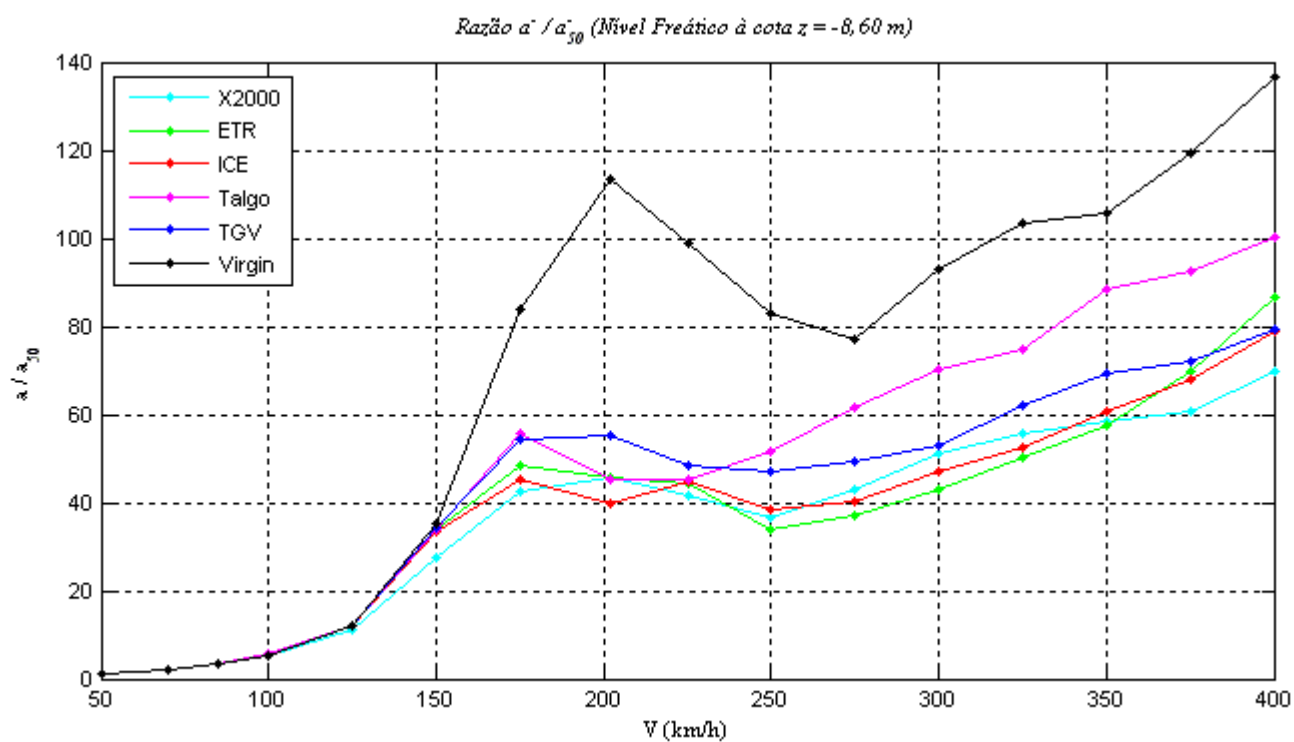
a)



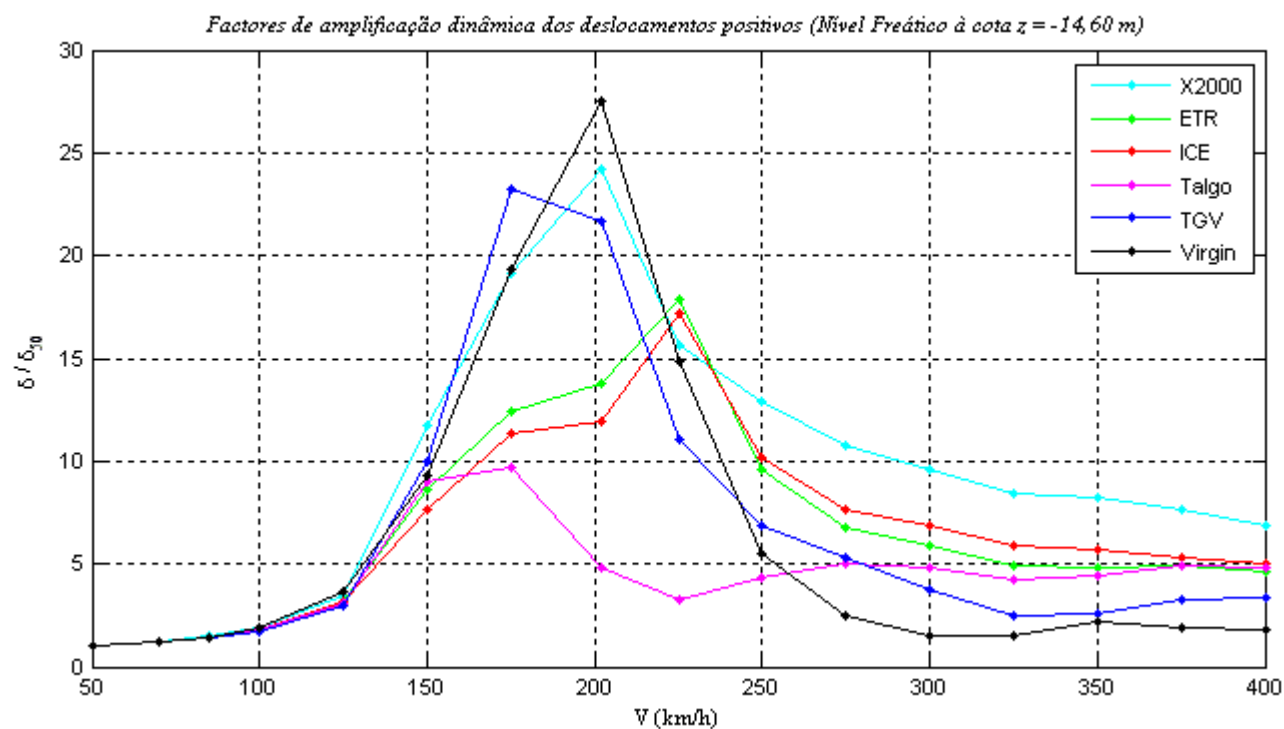
b)

A.19 – Nível Freático à cota $z = -8,60$ m: Razão entre as acelerações

a)



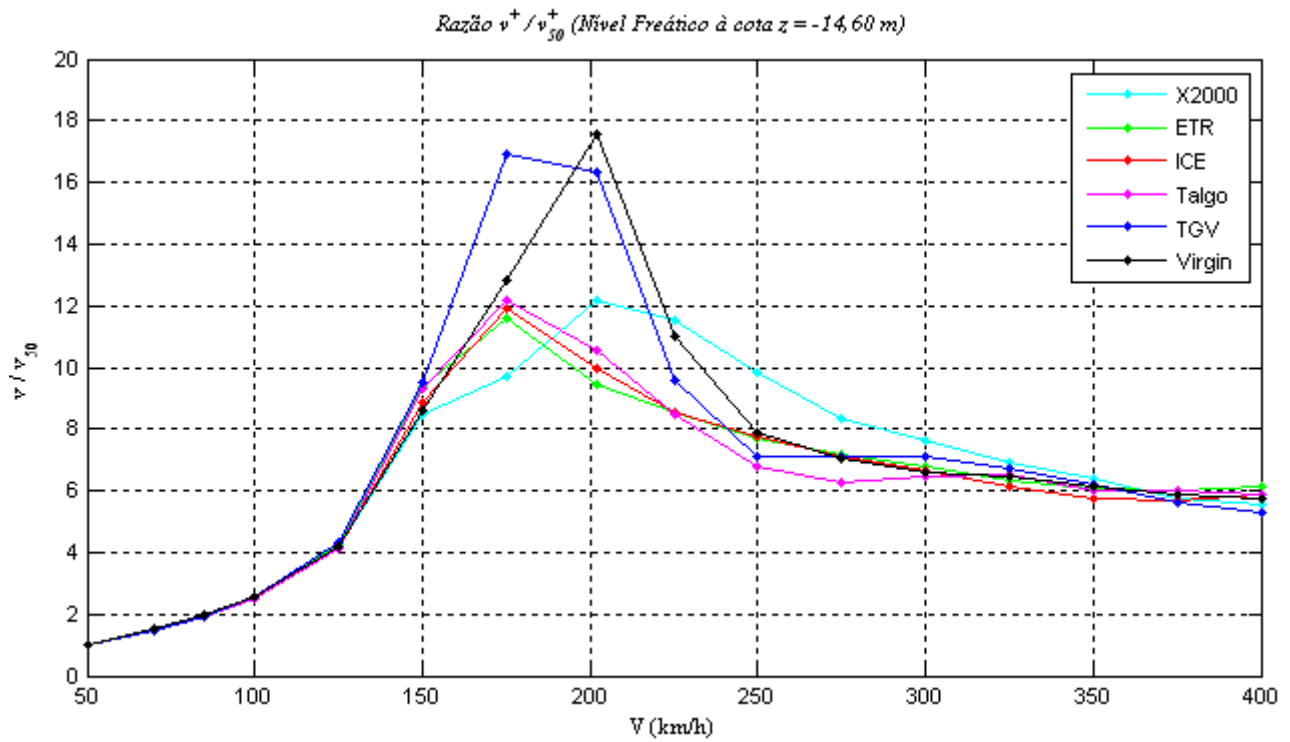
b)

A.20 – Nível Freático à cota $z = -14,60$ m: Factores de amplificação dos deslocamentos

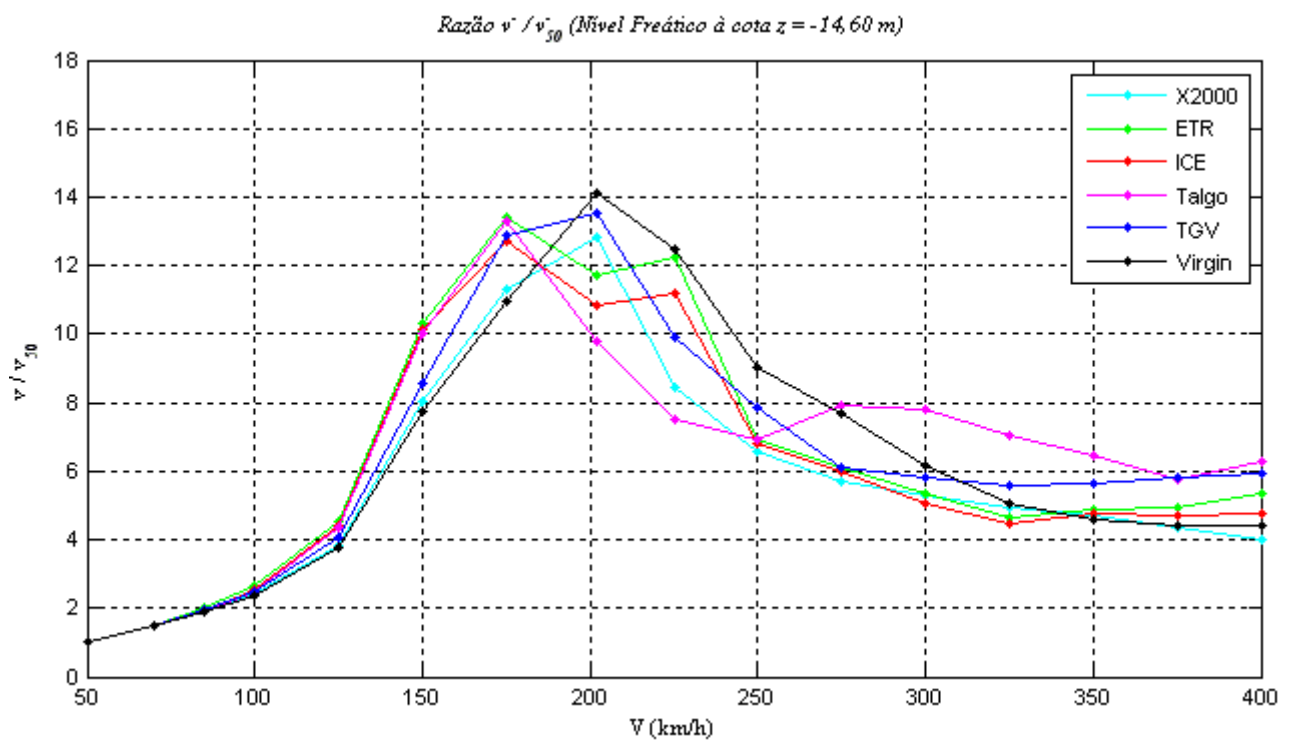
a)



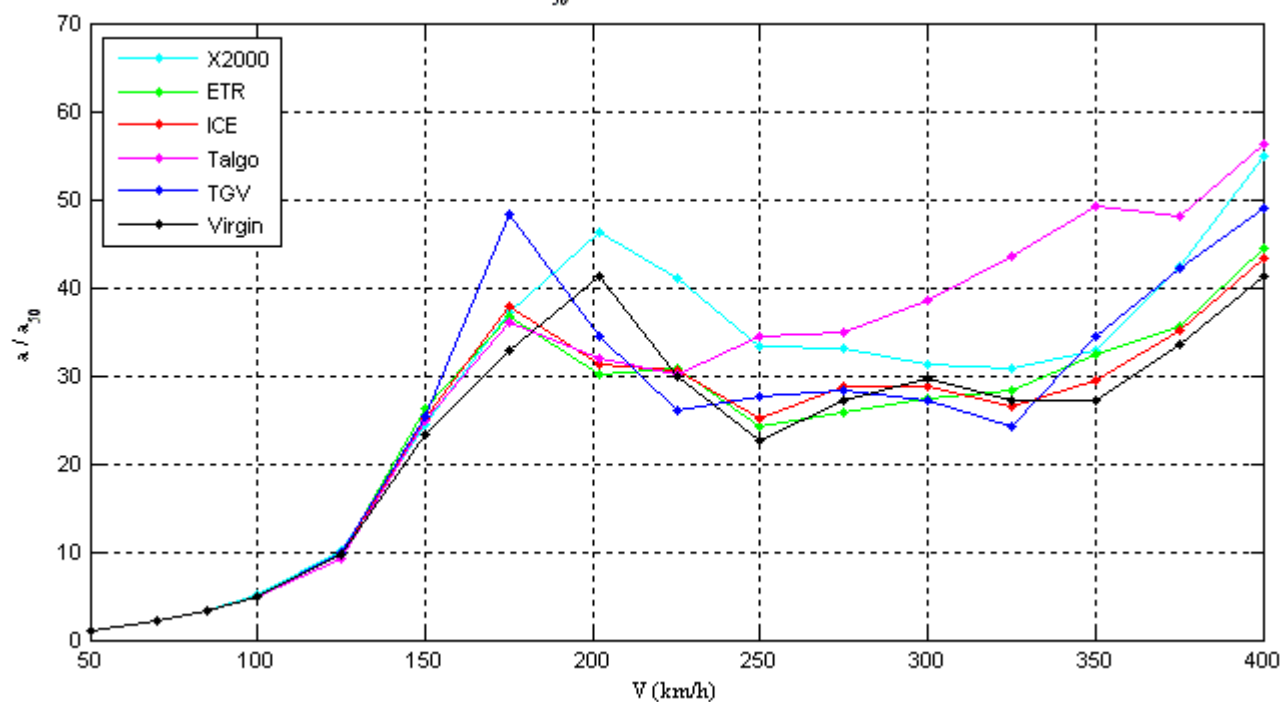
b)

A.21 – Nível Freático à cota $z = -14,60$ m: Razão entre as velocidades

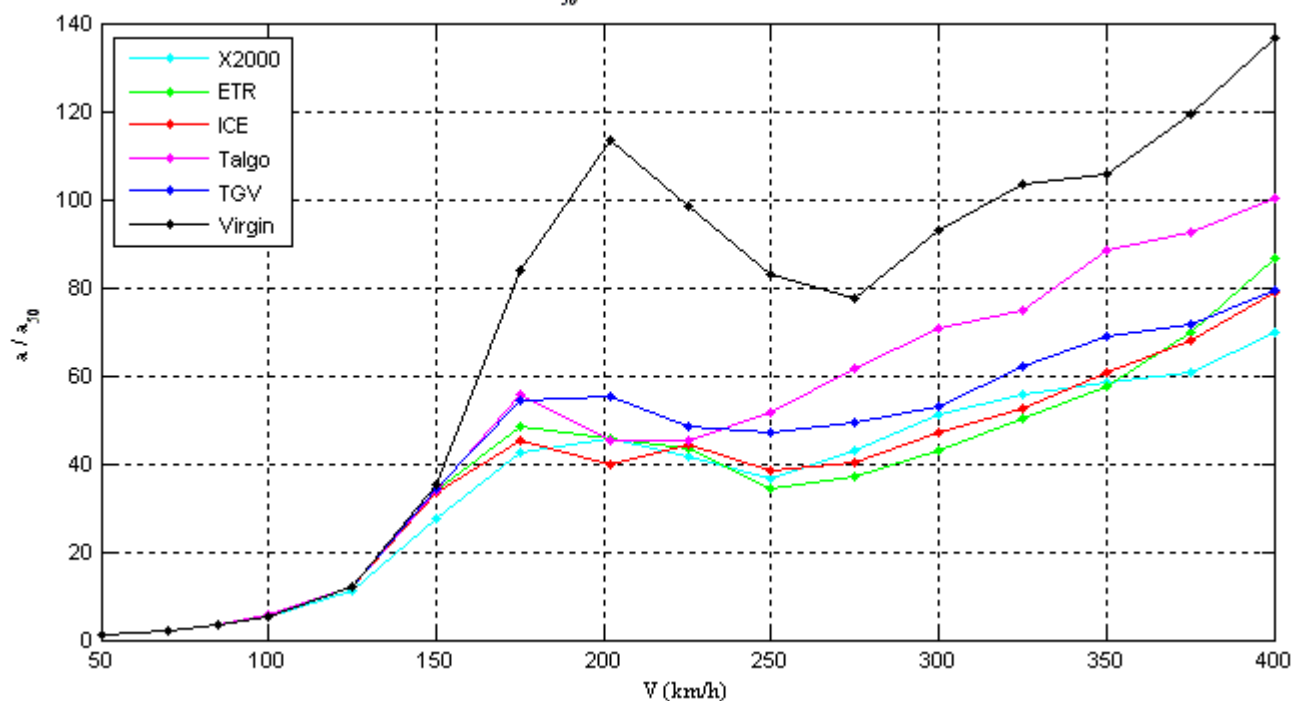
a)



b)

A.22 – Nível Freático à cota $z = -14,60$ m: Razão entre as aceleraçõesRazão a^+ / a_{50}^+ (Nível Freático à cota $z = -14,60$ m)

a)

Razão a^- / a_{50}^- (Nível Freático à cota $z = -14,60$ m)

b)

A.23 – Deslocamentos, velocidades e acelerações ao longo da via para maciços com diferentes profundidades do Nível Freático e submetido à passagem de comboios de AV a uma velocidade de 50 km/h

Nível Freático à cota $z = -1,10$ m

Comboio	Deslocamentos (mm)		Velocidades (mm/s)		Acelerações (mm/s ²)	
	δ^+_{\max}	δ^-_{\min}	v^+_{\max}	v^-_{\min}	a^+_{\max}	a^-_{\min}
X2000	0,61	-8,58	23,65	-23,87	191,87	-167,74
ETR	0,76	-8,65	26,34	-24,68	216,01	-150,85
ICE	0,79	-8,93	27,31	-24,91	231,45	-165,41
Talgo	0,73	-8,17	25,02	-22,59	230,95	-158,80
TGV	0,77	-9,06	24,44	-24,14	203,33	-155,28
Virgin	0,77	-8,91	25,56	-23,57	207,09	-107,68
Média	0,76	-8,78	25,29	-24,00	211,55	-157,04

Nível Freático à cota $z = -4,10$ m

Comboio	Deslocamentos (mm)		Velocidades (mm/s)		Acelerações (mm/s ²)	
	δ^+_{\max}	δ^-_{\min}	v^+_{\max}	v^-_{\min}	a^+_{\max}	a^-_{\min}
X2000	0,65	-10,56	26,41	-27,04	203,72	-172,35
ETR	0,83	-10,57	29,44	-26,85	230,32	-164,71
ICE	0,85	-10,93	30,55	-27,88	246,20	-177,73
Talgo	0,79	-9,96	27,85	-25,30	240,22	-164,07
TGV	0,84	-11,54	27,72	-27,85	216,06	-159,37
Virgin	0,85	-11,29	28,56	-27,60	222,89	-97,12
Média	0,83	-10,75	28,21	-27,32	226,61	-164,39

Nível Freático à cota $z = -8,60$ m

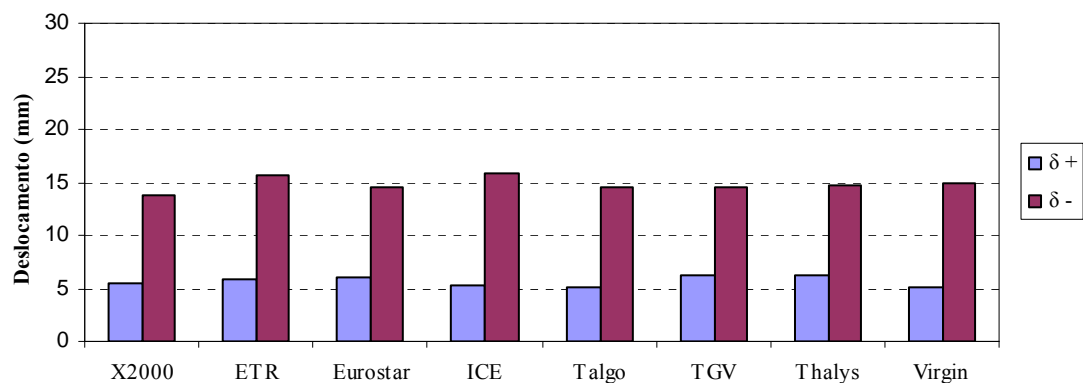
Comboio	Deslocamentos (mm)		Velocidades (mm/s)		Acelerações (mm/s ²)	
	δ^+_{\max}	δ^-_{\min}	v^+_{\max}	v^-_{\min}	a^+_{\max}	a^-_{\min}
X2000	0,64	-10,82	26,58	-27,27	204,16	-172,10
ETR	0,82	-10,83	29,66	-26,90	230,82	-164,88
ICE	0,84	-11,18	30,79	-28,08	246,70	-177,79
Talgo	0,78	-10,19	28,06	-25,49	240,37	-164,07
TGV	0,84	-11,82	27,92	-28,00	216,64	-159,19
Virgin	0,85	-11,59	28,73	-27,81	223,52	-96,63
Média	0,83	-11,01	28,40	-27,54	227,17	-164,47

Nível Freático à cota $z = -14,60$ m

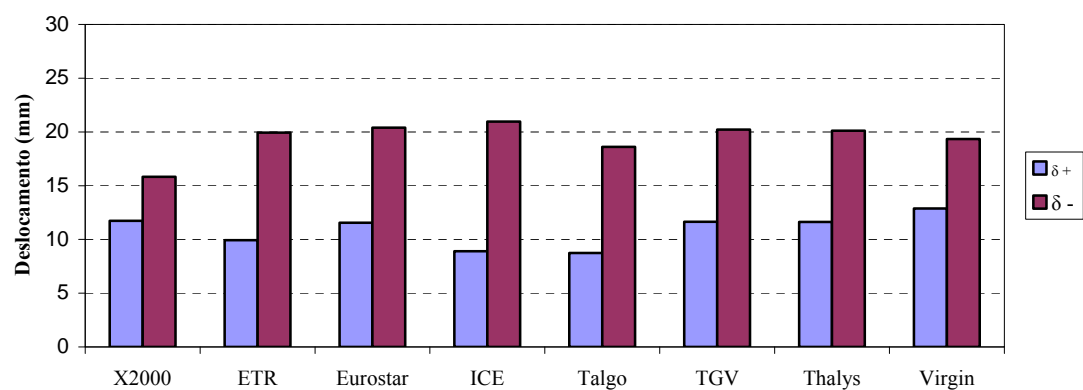
Comboio	Deslocamentos (mm)		Velocidades (mm/s)		Acelerações (mm/s ²)	
	δ^+_{\max}	δ^-_{\min}	v^+_{\max}	v^-_{\min}	a^+_{\max}	a^-_{\min}
X2000	0,62	-10,88	26,61	-27,31	204,20	-172,05
ETR	0,80	-10,91	29,69	-26,90	230,85	-164,84
ICE	0,82	-11,24	30,83	-28,12	246,74	-177,75
Talgo	0,76	-10,24	28,10	-25,52	240,36	-164,03
TGV	0,82	-11,90	27,93	-28,00	216,66	-159,18
Virgin	0,83	-11,66	28,76	-27,83	223,55	-96,64
Média	0,81	-11,08	28,43	-27,57	227,20	-164,44

A.24 – Nível Freático à cota $z = -1,10$ m: Deslocamentos máximos para as velocidades 150, 175, 202, 225 e 250 km/h

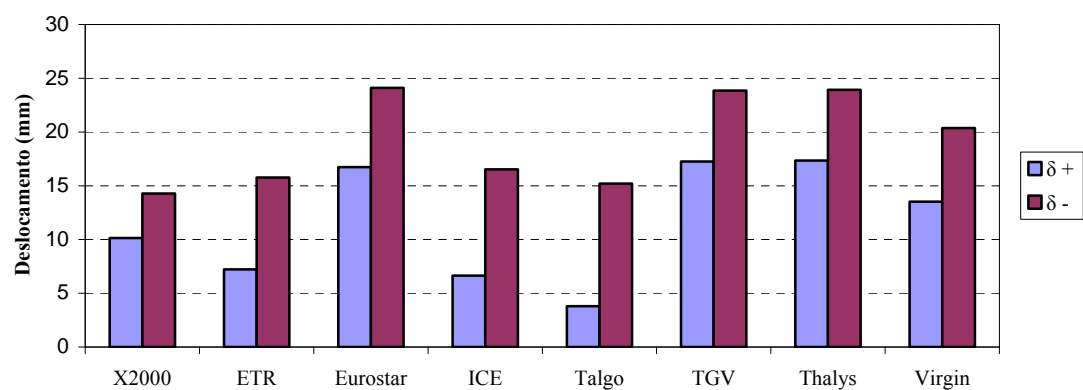
NF à cota $z = -1,10$ m ($V = 150$ km/h)



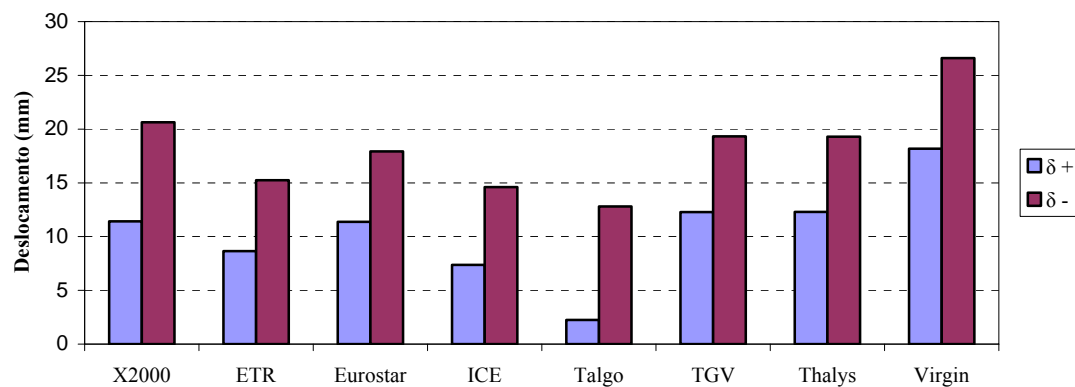
NF à cota $z = -1,10$ m ($V = 175$ km/h)



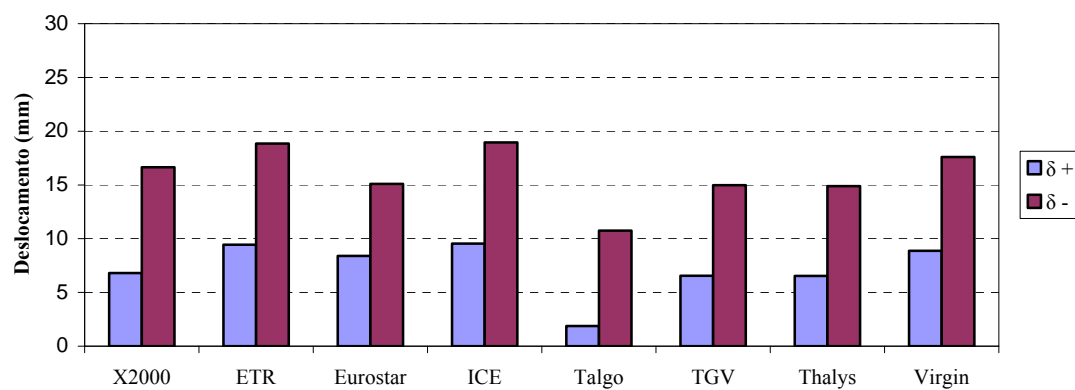
NF à cota $z = -1,10$ m ($V = 202$ km/h)



NF à cota $z = -1.10$ m ($V = 225$ km/h)

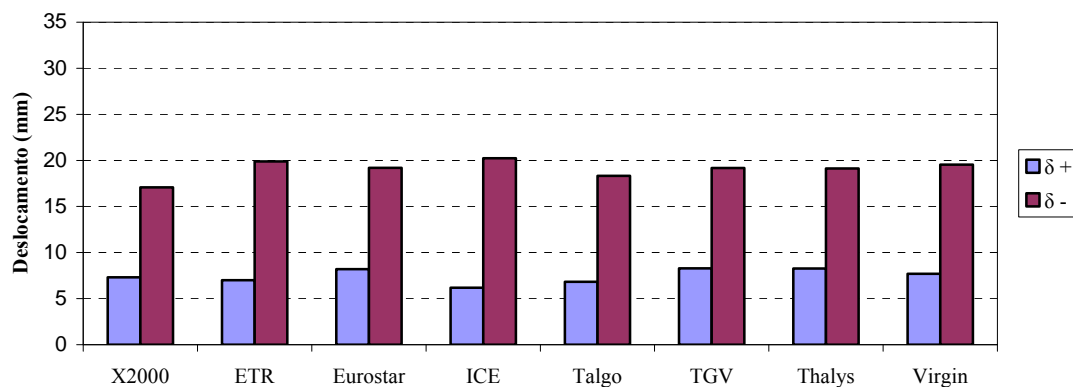


NF à cota $z = -1.10$ m ($V = 250$ km/h)

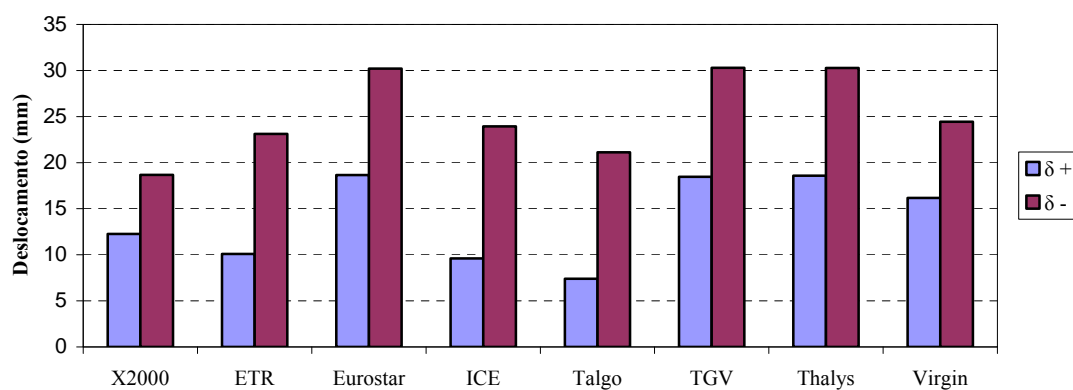


A.25 – Nível Freático à cota $z = -4,10$ m: Deslocamentos máximos para as velocidades 150, 175, 202, 225 e 250 km/h

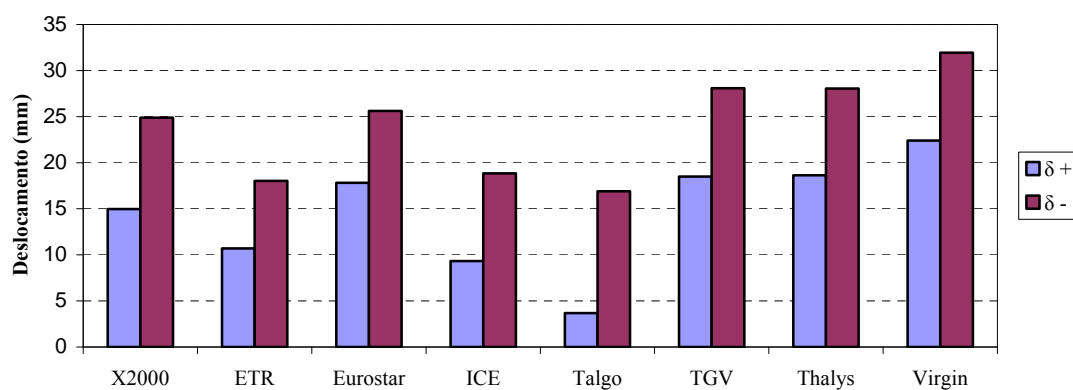
NF à cota $z = -4,10$ m ($V = 150$ km/h)



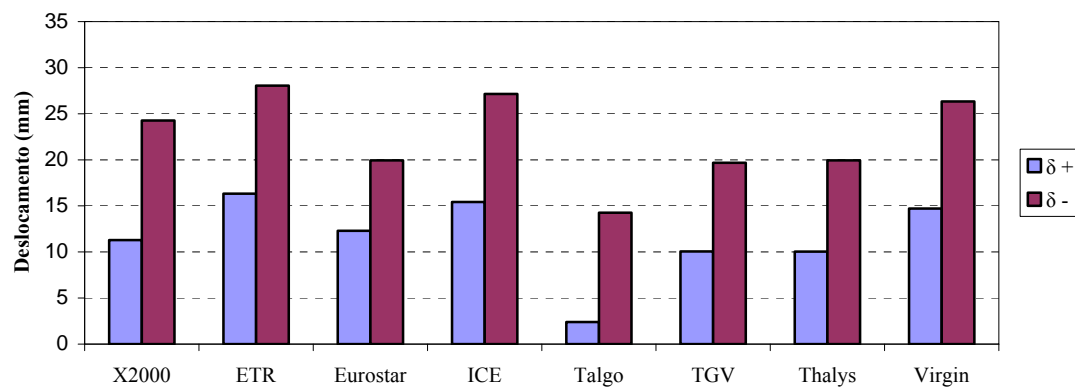
NF à cota $z = -4,10$ m ($V = 175$ km/h)



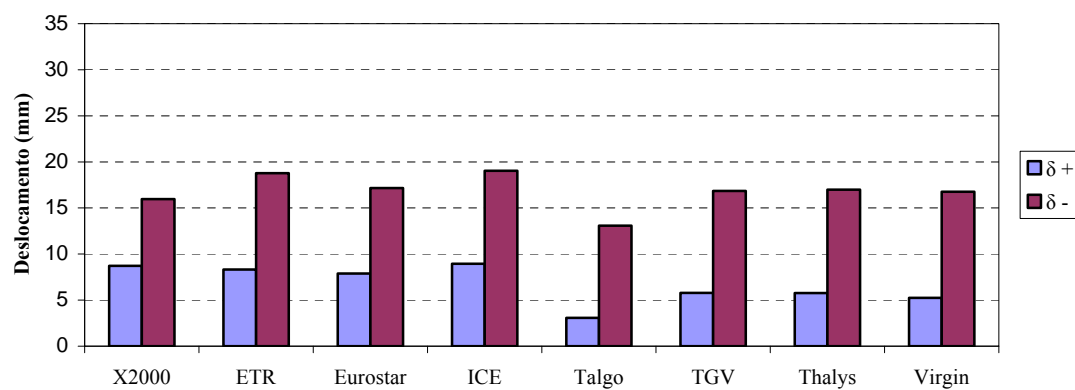
NF à cota $z = -4,10$ m ($V = 202$ km/h)



NF à cota $z = -4.10$ m ($V = 225$ km/h)

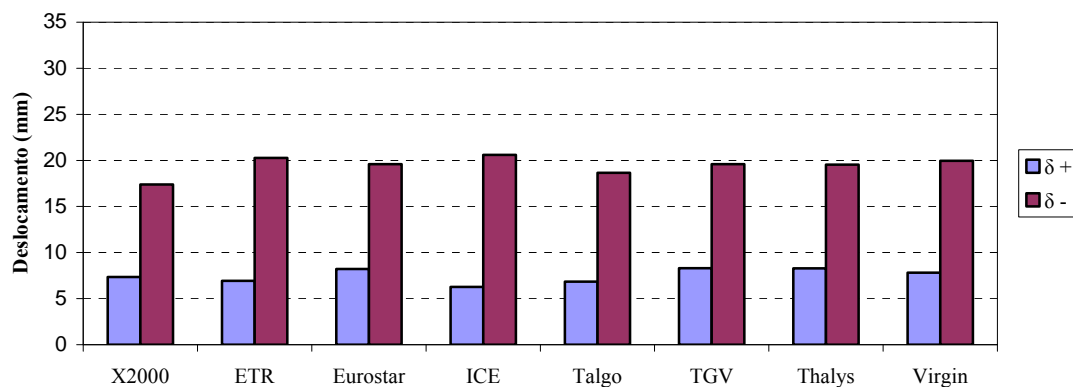


NF à cota $z = -4.10$ m ($V = 250$ km/h)

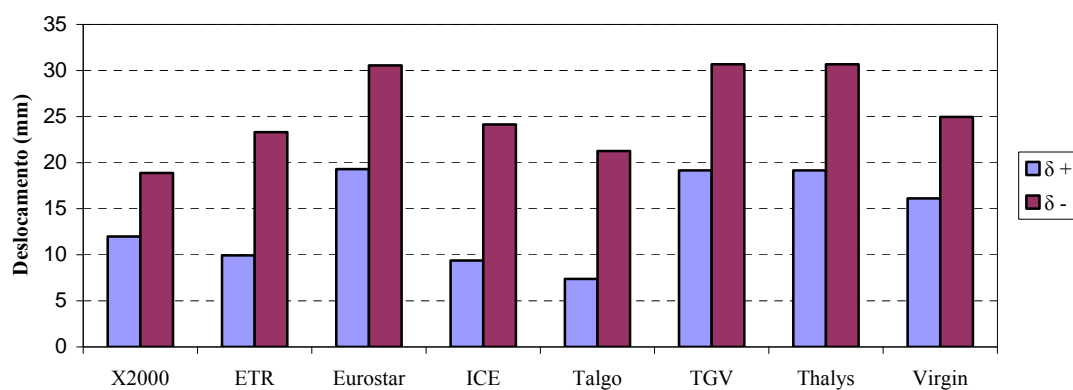


A.26 – Nível Freático à cota $z = -8,60$ m: Deslocamentos máximos para as velocidades 150, 175, 202, 225 e 250 km/h

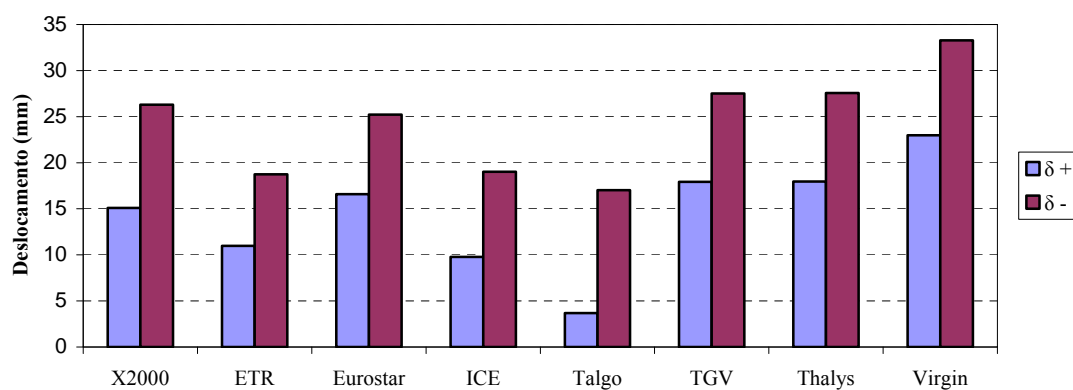
NF à cota $z = -8,60$ m ($V = 150$ km/h)



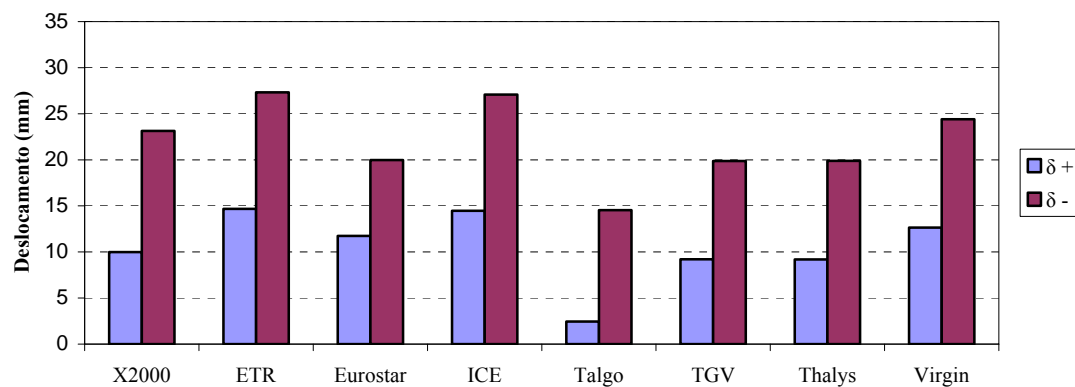
NF à cota $z = -8,60$ m ($V = 175$ km/h)



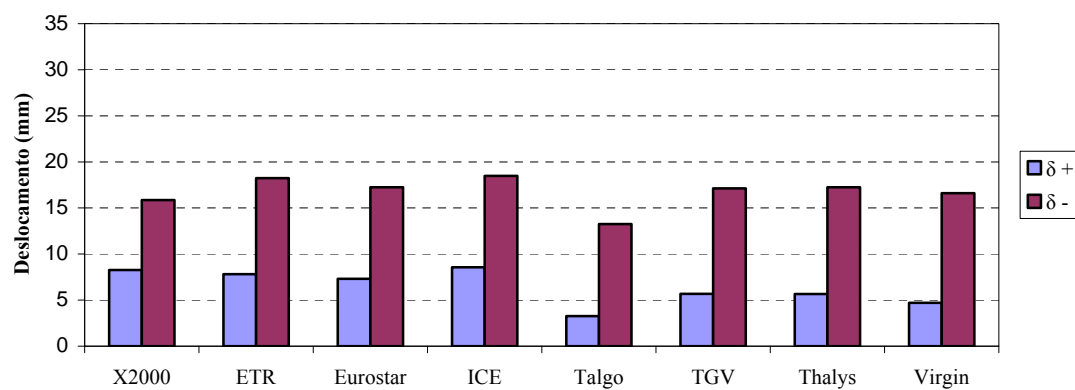
NF à cota $z = -8,60$ m ($V = 202$ km/h)



NF à cota $z = -8.60$ m ($V = 225$ km/h)

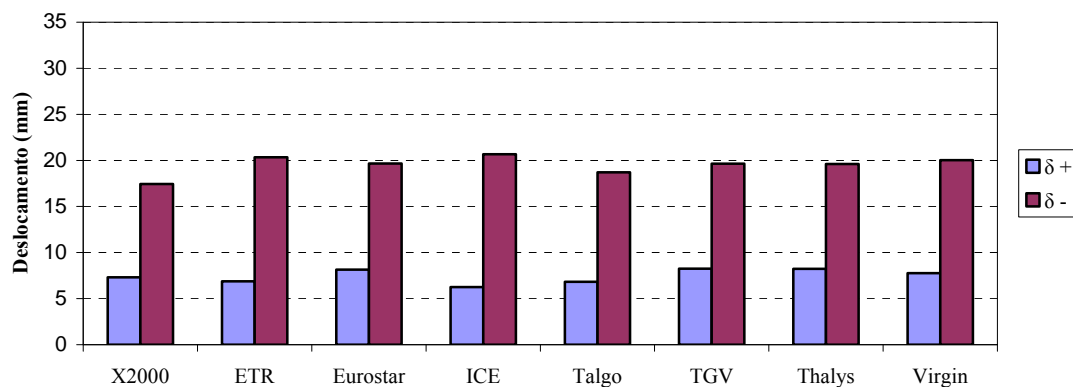


NF à cota $z = -8.60$ m ($V = 250$ km/h)

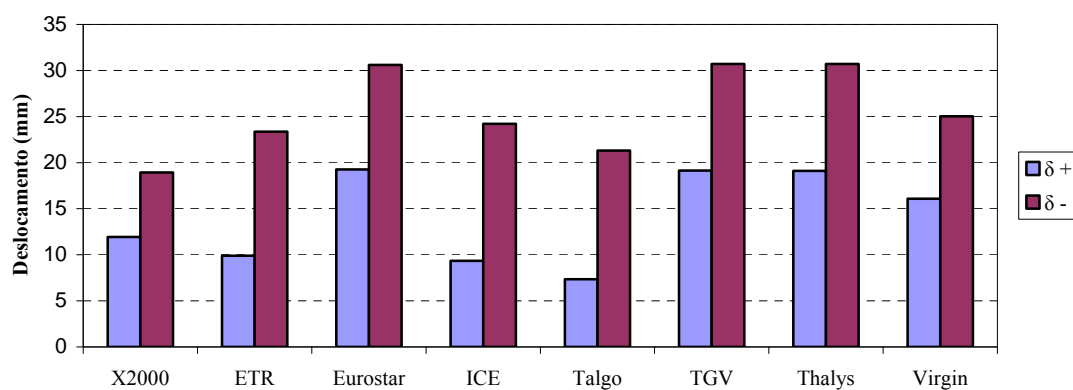


A.27 – Nível Freático à cota $z = -14,60$ m: Deslocamentos máximos para as velocidades 150, 175, 202, 225 e 250 km/h

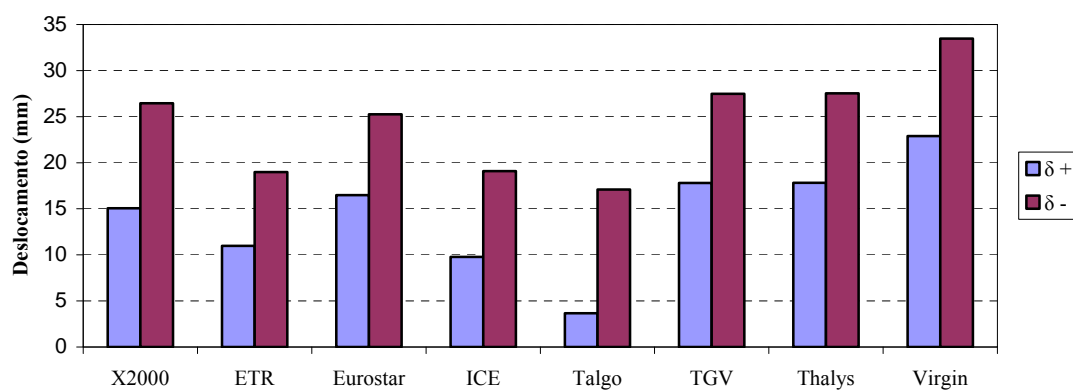
NF à cota $z = -14,60$ m ($V = 150$ km/h)



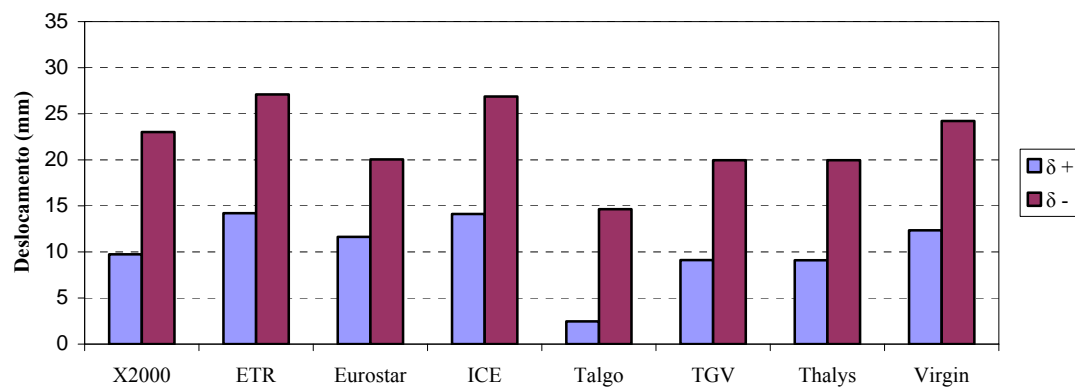
NF à cota $z = -14,60$ m ($V = 175$ km/h)



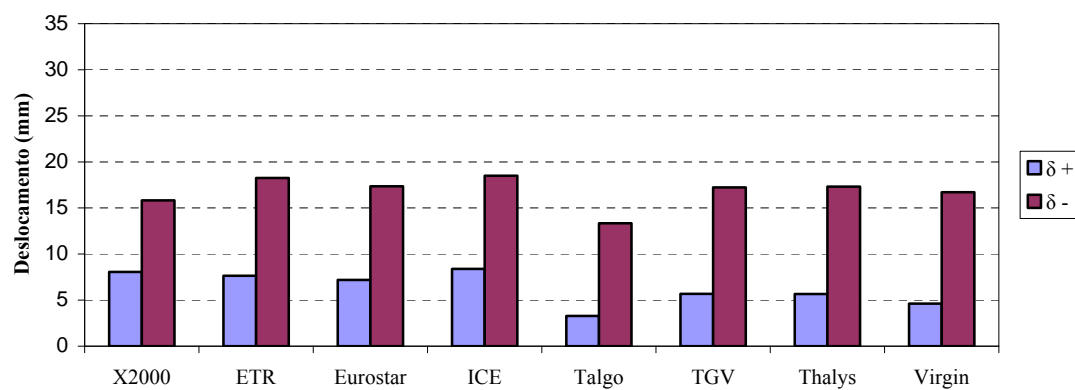
NF à cota $z = -14,60$ m ($V = 202$ km/h)



NF à cota $z = -14.60$ m ($V = 225$ km/h)



NF à cota $z = -14.60$ m ($V = 250$ km/h)

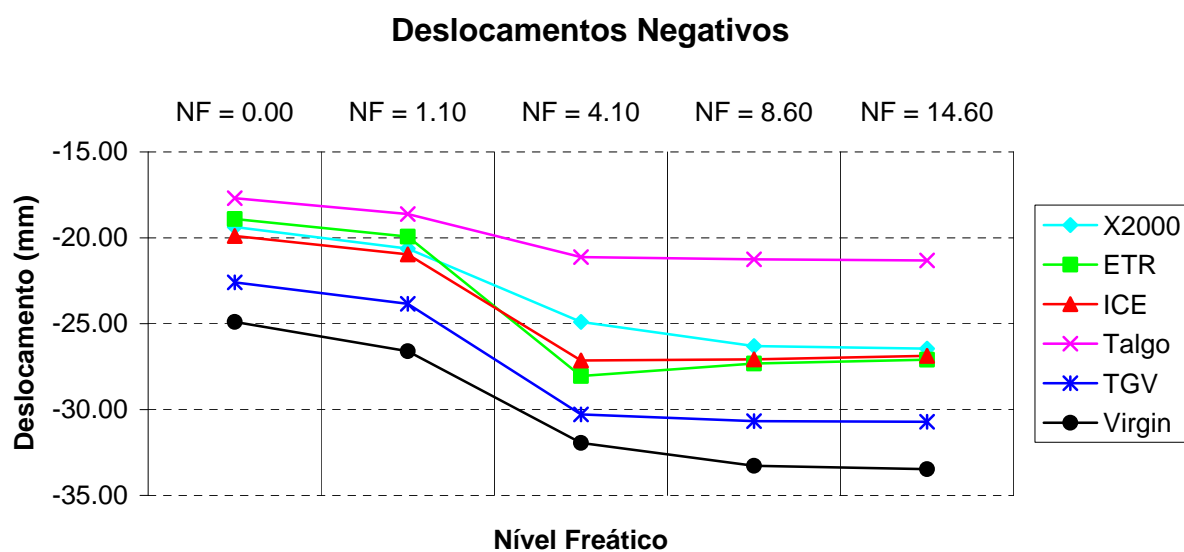
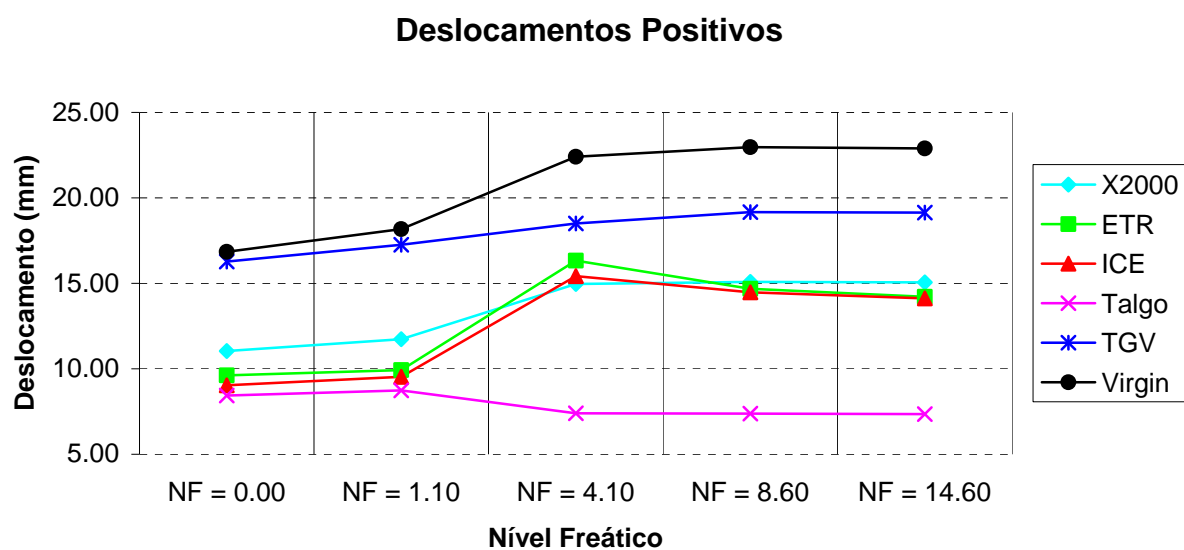


A.28 – Velocidades e Acelerações máximas para às diferentes posições do Nível Freático

Comboio		Posição do Nível Freático				
		NF 0,00 m	NF -1,10 m	NF -4,10 m	NF -8,60 m	NF -14,60 m
X2000	v^+ (mm/s)	270,02	283,65	335,81	326,07	324,55
	v^- (mm/s)	-275,12	-287,88	-358,38	-352,78	-351,07
ETR	v^+ (mm/s)	295,12	311,87	342,38	343,12	343,39
	v^- (mm/s)	-345,03	-362,11	-374,46	-360,86	-360,64
ICE	v^+ (mm/s)	315,24	334,45	366,95	367,76	368,05
	v^- (mm/s)	-359,49	-375,05	-362,51	-358,23	-358,00
Talgo	v^+ (mm/s)	309,31	318,76	341,37	342,20	342,46
	v^- (mm/s)	-339,43	-354,73	-340,39	-338,77	-338,77
TGV	v^+ (mm/s)	435,70	452,34	471,97	472,13	472,41
	v^- (mm/s)	-320,58	-346,67	-391,86	-380,01	-379,02
Virgin	v^+ (mm/s)	404,21	421,85	496,81	506,06	505,22
	v^- (mm/s)	-329,19	-346,39	-391,78	-393,70	-392,09

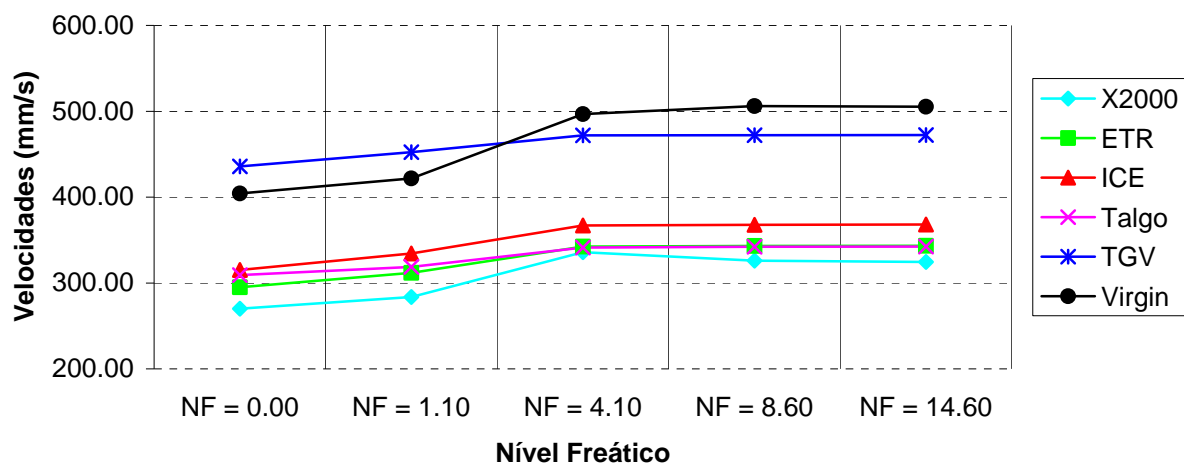
Comboio		Posição do Nível Freático				
		NF 0,00 m	NF -1,10 m	NF -4,10 m	NF -8,60 m	NF -14,60 m
X2000	a^+ (mm/s ²)	11740,79	10531,52	11224,94	11209,65	11211,49
	a^- (mm/s ²)	-12210,20	-11200,84	-11985,56	-11974,89	-11974,58
ETR	a^+ (mm/s ²)	11350,05	10518,72	10282,53	10259,67	10259,72
	a^- (mm/s ²)	-14065,46	-13448,31	-14265,40	-14287,23	-14287,97
ICE	a^+ (mm/s ²)	11964,12	11071,87	10571,03	10704,33	10704,50
	a^- (mm/s ²)	-14487,24	-13539,81	-14022,57	-14049,88	-14050,11
Talgo	a^+ (mm/s ²)	12758,63	11217,90	13667,96	13533,49	13530,54
	a^- (mm/s ²)	-16587,46	-14481,24	-16766,26	-16473,78	-16471,02
TGV	a^+ (mm/s ²)	11537,56	10485,27	10578,50	10621,61	10621,86
	a^- (mm/s ²)	-13417,30	-12558,38	-12791,64	-12658,20	-12655,94
Virgin	a^+ (mm/s ²)	9544,16	8980,69	9208,38	9227,83	9243,48
	a^- (mm/s ²)	-13192,67	-12852,79	-13182,65	-13212,85	-13212,66

A.29 – Deslocamentos máximos para às diferentes posições do Nível Freático

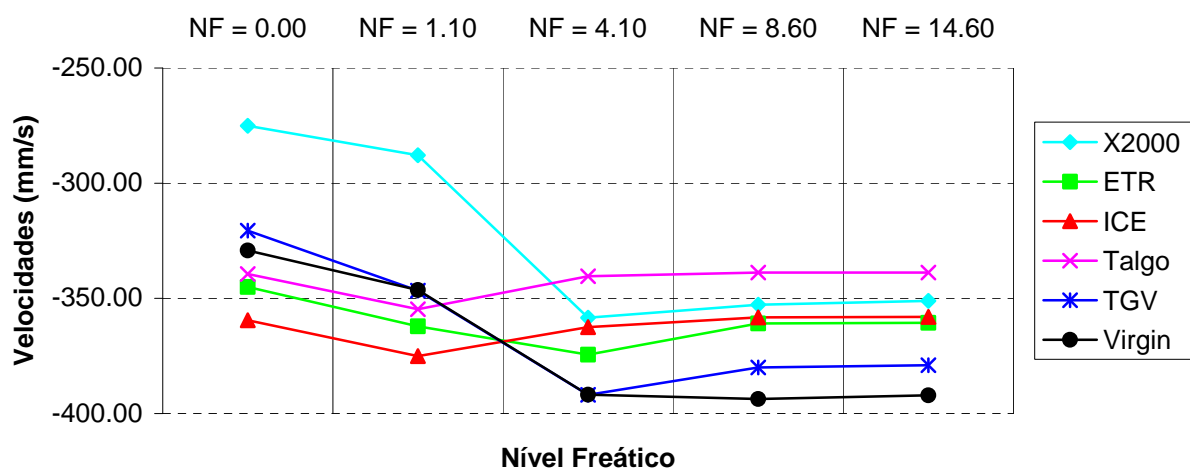


A.30 – Velocidades máximas para às diferentes posições do Nível Freático

Velocidades Positivas

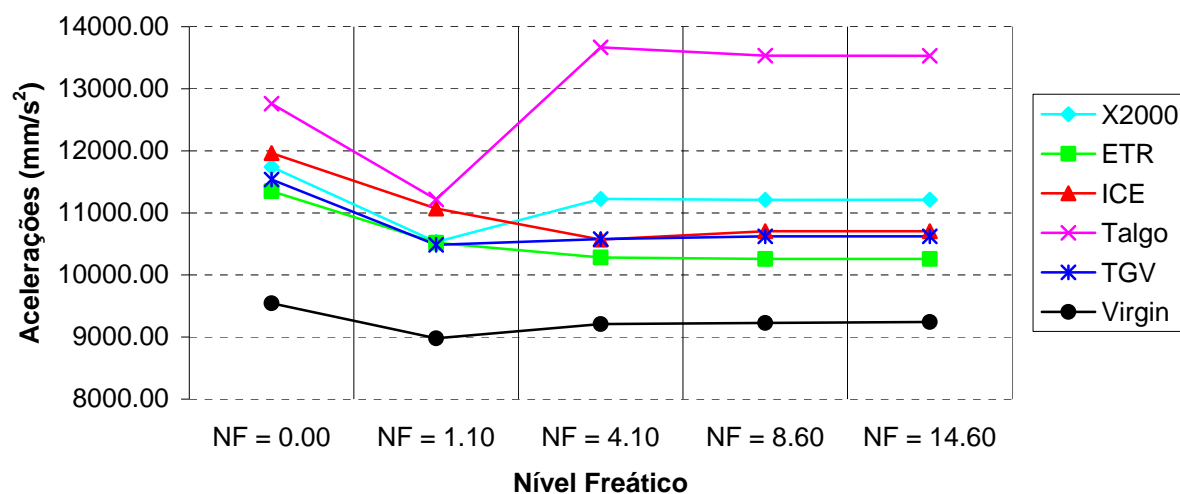


Velocidades Negativas



A.31 – Acelerações máximas para às diferentes posições do Nível Freático

Acelerações Positivas



Acelerações Negativas

